



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE DE FINAL DE GRAU

Enginyeria Mecànica

PROJECTE DE DISSENY I SIMULACIÓ D'UN NOU SISTEMA DE SUSTENTACIÓ PER A QUADRICÒPTERS

Autor: Aleix Badia Vila

Director: Marc Antoni Soler

Convocatòria: Octubre del 2015



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Emplenar per l'estudiant/a

ESTUDIANT/A: _____ Núm. Identificatiu _____
 GRAU EN: _____
 DIRECTOR/A DEL TFG: _____
 DEPARTAMENT: _____
 REALITZACIÓ EN ANGLÈS: Sí No
 MODALITAT: 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694

DESCRIPCIÓ:

SOL·LICITUD PER A SER AVALUAT DE LES COMPETÈNCIES GENÈRIQUES EN NIVELL 3 (si no estan assolides)	Sí	No
1.- Emprenedoria i innovació		
2.- Sostenibilitat i compromís social		
3.- Tercera Llengua		
4.- Comunicació eficaç oral i escrita		
5.- Ús solvent dels recursos d'informació		
6.- Aprenentatge autònom		
7.- Treball en equip		

Estudiant/a

Signatura

Data Registre : (validesa: un any des de la data del registre)

3 Exemplars: Director/a / Secretaria de l'Escola / Estudiant/a per incorporar al TFG

* Normativa Transitòria fins que l'aplicatiu PRISMA permeti la gestió telemàtica del TFG
(Document aprovat per la Comissió Permanent de 5 de juliol de 2012, i per la Junta de Centre de 12 de juliol de 2012)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Emplenar per l'estudiant/a

BREU RESUM DEL TFG (màxim 500 paraules):

'PARAULES CLAU (entre 2 i 5):

AUTORITZO A PUBLICAR EL TREBALL A UPCommons: Sí No

Director/a	Co-director/a (si s'escau)	Estudiant/a
------------	-------------------------------	-------------

Signatura _____ Signatura _____ Signatura _____

Data liurament :

Lliurar a la secretaria: 1 còpia en paper de la memòria del TFG.

4 còpies en versió digital (CD o DVD) de la memòria del TFG

2 Exemplars: Secretaria de l'Escola / Estudiant/a

* Normativa Transitòria fins que l'aplicatiu PRISMA permeti la gestió telemàtica del TFG
(Document aprovat per la Comissió Permanent de 5 de juliol de 2012, i per la Junta de Centre de 12 de juliol de 2012)

Summary:

Flying machines are exciting; I know that from my early age.

As a first step, the project was focused in creating a drone by printing, using 3D printer technology.

Before start working with the project's draft I learned about a surprising technology used in a new kind of electric fans: the bladeless fans. That made me think in the challenge to design a bladeless drone. The main idea was providing the needed power fly with four turbines. Those turbines won't supply the power directly, but sending the air flow to four different diffusers to try to get an additional air flow due to the venturi effect.

That project is a summary of the entire job done during the process. From the basic aerodynamics concepts used to design the drone, to the final creation of the designs.

An important tool to carry out the project is the use of *Solidworks* to draw the pieces for the construction of the drone. It's also explained how the 3D printers work, showing also the results and details of the printed pieces. After choosing many different designs and positions of printing, the final prototype became a fact. The last part summarizes all the tests done with the diffusers.

As it's explained in the project, the results of those tests are not the expected ones to be able to let the craft fly. For that reason and from that point the project is redirected to a simulation project.

Simulations have been used to check how the air flows in the diffusers, how to calculate and improve as possible the efficiency of the system. The simulation part provides conclusions on the not suitability of the bladeless/venturi effect technology as a practical alternative in the drones' construction, unless a total modification of the concept.

1. Índex

1.	Índex.....	5
2.	Resum.....	7
3.	Objectius	7
4.	Motivació.....	8
5.	Estat actual de l'art	9
5.1.	Breu història.....	9
5.2.	Tipus i aplicacions dels drones:	11
5.3.	Innovació:.....	13
6.	Fonaments.....	14
6.1.	L'aerodinàmica que afecta els difusors:.....	14
6.1.1.	Introducció:	14
6.1.2.	L'interior del difusor	21
6.1.3.	L'exterior del difusor	23
6.1.4.	Control del drone	26
6.2.	Disseny mitjançant <i>Solidworks</i>	29
6.3.	Simulació	30
6.3.1.	<i>Ansys Fluent</i>	30
6.3.2.	<i>Solidworks Simulation</i>	34
6.4.	Impressió 3D.....	36
6.4.1.	Tipus d'impressores	36
6.4.2.	BCN3D+	43
6.4.3.	Procés d'impressió	44
7.	Càlculs i procediments	47
7.1.	Elaboració d'un disseny imprimible en 3D	48
7.2.	Anàlisi estructural del drone	55
7.3.	Creació d'un disseny per fer proves amb la turbina	60
7.4.	Proves amb la turbina	67
7.5.	Replantejament del projecte. Passos previs	71

8.	Simulacions:	74
8.1.	Iniciació en la simulació mitjançant <i>Fluent</i> . Tutorial sobre la simulació d'una conducció en forma de colze.	74
8.2.	Primera simulació de l'interior del difusor.....	76
8.3.	Primera simulació de l'exterior del difusor	79
8.4.	Càlcul de la sustentació.....	82
8.5.	Primeres conclusions sobre el funcionament	87
8.6.	Què faria falta per fer volar un drone partint del disseny anterior?	88
8.7.	Comportament de l'interior del difusor per a una gamma de velocitats d'entrada de 15 m/s a 75 m/s.....	88
8.8.	Comportament de l'exterior del difusor per a una gamma de velocitats d'entrada de 30 m/s a 110 m/s.....	93
8.9.	Estudi i conclusions dels dos comportaments	101
9.	Estimació de costos	104
10.	Conclusions generals del projecte.....	105
11.	Referències bibliogràfiques.....	106

2. Resum

Des d'un inici aquest projecte pretenia desenvolupar un drone amb un sistema de sustentació innovador. La idea era aconseguir fer-lo levitar gràcies a la potència de 4 turbines que propulsaven l'aire cap a 4 difusors. Aquests al seu temps constaven d'un disseny basat en l'efecte venturi per tal de reduir les pèrdues en forma de turbulències que provoquen les hèlices al girar. Cada una de les peces que formen els difusors han estat dissenyades mitjançant el programa de CAD *Solidworks*, i impreses amb una impressora de modelatge 3D. Degut a dificultats tècniques explicades dins el cos del treball, finalment el projecte ha estat redirigit a l'estudi aerodinàmic de cada un dels difusors. Pretén analitzar i extreure conclusions sobre si és possible la utilització d'aquesta tecnologia per tal de fer volar un drone.

Aquest treball mostra tota l'evolució duta a terme durant l'intent de creació del prototip, les peces impreses, els dissenys realitzats, les proves pràctiques desenvolupades, els motius que han fet redirigir el projecte, la conseqüent reestructuració de la feina, l'estudi aerodinàmic realitzat amb Ansys i finalment les conclusions extretes.

3. Objectius

L'objectiu inicial del projecte és la creació d'un drone amb un principi de funcionament basat en l'efecte Venturi. El disseny està inspirat en un tipus de ventiladors sense aspes i inicialment pretén comprovar-ne la seva viabilitat. Per fer-ho em centro en el disseny de quatre difusors iguals impresos en 3D que mitjançant les respectives entrades d'aire proporcionades per quatre turbines han de generar una força de sustentació suficient com per fer volar el prototip.

Essent conscient que és possible que la idea fracassi em plantejo un segon propòsit. Si mitjançant estudis amb el prototip veig que la força generada no és suficient em redirigiré cap a la simulació. Mitjançant un estudi de l'aerodinàmica dels difusors dissenyats extreure conclusions sobre la viabilitat del projecte.

4. Motivació

Ja des de ben petit em fascinen tot tipus d'aparells que tenen moviment. Des de trens, màquines, cremalleres, avions, helicòpters, autogirs, etc. En concret sempre he sentit una gran admiració per les màquines capaces de volar. Fa anys, la idea de poder controlar un aparell volador era més aviat complicada i reservada per als adults. Tot i que hi havia avions i helicòpters teledirigits, no havia arribat a entrar mai en aquest món. Tot això ha canviat els darrers anys gràcies a l'avanç tecnològic i a l'interès del meu germà petit pel món del ràdio control.

Vam començar amb un petit helicòpter teledirigit. Les prestacions eren molt limitades. Es tractava d'un helicòpter molt senzillet. No devia fer més d'un pam de llargada i només el podíem fer volar per l'interior. Tot i així, he de dir que només veure i controlar un aparell que no tocava a terra ja em va despertar un gran interès. Des d'aleshores hem anat provant i aprenent a controlar altres "joguines" teledirigides. Des de petits avions, també molt senzills, passant per un altre helicòpter d'interior un pèl més sofisticat, fins a un avió ja d'unes dimensions considerables. Tot aquesta etapa ha quedat culminada amb l'aparició dels drones.

De petit em fascinava veure'ls volar i de més gran em vaig començar a plantejar la idea de construir-ne un. Va ser aleshores, coincidint amb el final del grau en enginyeria mecànica que estic acabant, quan em vaig proposar dissenyar i crear un drone.

Els primers dies, després de donar voltes sobre mides, aplicacions, formes, potències, etc... vaig descobrir quin seria el tret distintiu del quadricòpter que volia crear. Vaig trobar un nou tipus de ventiladors, concretament de la casa Dyson, que funcionaven sense aspes. Després de donar-hi voltes i informar-me sobre el seu funcionament em va venir la idea al cap d'intentar fer funcionar un drone utilitzant el mateix principi. El principi de Venturi.

Segons semblava, el principi podia funcionar per poder aixecar el drone i controlar-lo d'una forma similar amb com funcionen els drones habituals. Així doncs, empès per una idea innovadora començo aquest treball de fi de grau on estudiaré i analitzaré la possibilitat de caviar els sistemes de propulsió d'un drone convencional, per un nou sistema més segur i possiblement eficient.

5. Estat actual de l'art

Els quadricòpters, o més genèricament anomenats multi rotors, són aparells que consten d'un mínim de tres rotors, amb les respectives hèlices. El seu funcionament es basa en la rotació simultània de totes les aspes per tal de generar una força suficient com per vèncer el pes del multi rotor i conseqüentment elevar-lo. La particularitat dels quadricòpters en concret és el fet d'emprar 4 rotors independents que provoquen quatre forces de sustentació a l'hora, fet que garanteix una molt bona estabilitat. El control de l'estabilitat, així com el pilotatge es duu a terme mitjançant petites variacions de la velocitat de gir de cada un dels rotors. Aquestes variacions proporcionen diferents forces de sustentació des de diferents punts. D'aquesta forma s'aconsegueix inclinar l'aparell to fent-lo avançar cap a la direcció desitjada.

Cal distingir entre un drone i un quadricòpter o més genèricament multi rotor. Com a definició general un drone és un vehicle aeri no tripulat. Aquests poden tenir formes i mides molt diverses i no tenen perquè constar de 3 o més rotors. Per exemple, n'hi ha d'ales fixes amb una aparença i funcionament similar al d'un avió. Cal dir que si actualment es barregen els conceptes drone i multi rotor és perquè l'estabilitat que proporcionen aquests últims ha estat molt útil a l'hora de dissenyar i programar drones amb una màxima estabilitat.

Actualment el principi de funcionament de la gran majoria d'aquests aparells es basa en la sustentació mitjançant rotors amb hèlices. El punt innovador del projecte passa per l'intent de crear un drone amb un principi de sustentació nou en aquest mercat en ple creixement.

5.1. Breu història.

Els primers multi rotors van aparèixer als volts de l'any 1900. En aquesta època es buscava una bona solució per l'anomenat *VTOL flight*¹. Semblava que la possibilitat de disposar de més d'un rotor separats una certa distància podia proporcionar una molt bona estabilitat. A més, oferia diversos avantatges respecte els helicòpters. En primer lloc, el fet de disposar de més d'un rotor trencava de forma eficaç el moment creat al girar les aspes. Fet així es podia prescindir del rotor de cua, encarregat de trencar amb la força de reacció de les aspes, tan sols fent que dos dels rotors gressin cap a una direcció i els altres dos en la contrària. A part d'això els helicòpters presentaven un altre problema. El fet de tenir el cos de l'aparell just sota les aspes feia que aquestes haguessin de ser molt llargues per minimitzar les pèrdues que el fusellatge de l'helicòpter provocava.

¹ El *VTOL flight* prové de l'anglès take off and land vertically. Tal i com el seu nom indica fa referència a tots els aparells aeris que poden enlairar-se i aterrar de forma vertical. L'exemple més conegut és l'helicòpter

El primer disseny provat el van fer dos germans francesos l'any 1907: Jacques and Louis Breguet. Van aconseguir l'enlairament del primer quadricòpter. Aquest va resultar molt inestable i per tant poc pràctic.

Més tard, un altre enginyer francès, Étienne Oehmichen va aconseguir volar, primer una distància de 630 m i finalment d'1 km, tot establint així un rècord mundial.

Tot i així, en aquella època, quan no existien ni ordinadors ni bons motors elèctrics, els helicòpters seguien presentant 2 principals avantatges:

- Un sol rotor proporcionava una estabilitat natural amb la qual no podien competir els quadricòpters.
- El motor tant sols havia de donar potència a un rotor. Això feia que el motor pogués està situat molt a prop de les aspes i pogués actuar de forma directe al rotor. Aquest fet minimitzava tant les pèrdues d'eficiència provocades pels elements mecànics, com el pes que provocaven tots els components necessaris per fer arribar la potència a quatre punts diferents del quadricòpter.

En aquella etapa la distribució de potència des del motor als rotors es feia mitjançant corretges. Deixant de banda que aquestes tenien un pes considerable, mecànicament el sistema no estava ben resolt. Les corretges sovint es trencaven i provocaven problemes de tracció. Deixant de banda la transmissió, com que els rotors no eren exactament idèntics entre ells, la mateixa velocitat entre aspes no garantia un vol estable. Aquest fet afegia una tasca de control molt gran al pilot, que sense la presència d'ordinadors, havia d'estabilitzar manualment el quadricòpter.

Vistes totes les pègues que suposaven els quadricòpters per l'època van acabar imposant-se els helicòpters d'un sol rotor, i en ocasions molt excepcionals, helicòpters de dos rotors si aquests eren molt grans.

La revolució dels quadricòpters va arribar més tard amb el desenvolupament dels motors elèctrics, i més concretament amb els micro dispositius electrònics i mecànics, els servos. Aquestes millores han facilitat la tasca d'estabilització que en els primers multi rotors havia de fer el pilot, facilitant-ne el control i inclús permetent que poguéssin prescindir d'un pilot a bord. Els multi rotors actuals són vehicles aeris no tripulats de relativament petites dimensions. Aquests consten d'un motor per rotor comandat i controlat per un microprocessador. Els microprocessadors monitoritzen constantment les dades de posició, inclinació i acceleració per tal d'estabilitzar en tot moment el drone. Aquestes dades s'aconsegueixen mitjançant acceleròmetres i giroscopis.

Actualment els drones estan en plena via de desenvolupament i la seva utilització mostra un creixement exponencial. S'utilitzen per una gran varietat d'aplicacions i n'hi ha de totes les mides i formes. Seguidament en faig una breu classificació segons tipus i usos.

5.2. Tipus i aplicacions dels drones:

Els drones o UAV² presenten un gran potencial en zones aèries molt diverses. El principal avantatge és la facilitat que presenten a l'hora de desplaçar-se de forma ràpida sobre qualsevol terreny irregular tot recollint informació mitjançant una gran varietat de sensors. Aquesta tecnologia es pot arribar a portar més enllà si es juga amb més d'un dron. La combinació de varis aparells organitzats i coordinats entre ells poden realitzar una tasca espectacular de recerca, rastreig, monitoratge de dades concretes, entre d'altres. Anem a veure'n diferents aplicacions:

Tasques de localització de persones:

Una de les aplicacions més útils que poden tenir els UAV en zones de difícil accés és la tasca de recerca de persones desaparegudes. Degut a les petites dimensions que presenten els podem trobar en estacions d'esquí, refugis d'alta muntanya, platges, etc... El principal avantatge que presenta aquesta tecnologia és la facilitat per aconseguir imatges aèries sense arriscar cap vida humana. Els drones més sofisticats poden arribar a comptar amb reconeixement automàtic de persones i posicionament GPS per tal de localitzar i marcar qualsevol punt d'interès. L'altre gran diferència és el baix cost que suposen en comparació amb un helicòpter.

Fotografia, vídeo i cartografia aèria:

El mercat de drones per aquest tipus d'aplicacions ha tingut un creixement brutal darrerament. Hi ha tot tipus de tricòpters, quadrocòpters, octocòpters, etc... amb una gran gamma de prestacions. Des de joguines econòmiques controlades des del telèfon mòbil, fins a grans multi rotors professionals equipats amb càmeres de gran qualitat. Darrerament la seva aplicació s'ha vist tant en el món del cinema, com en el rodatge de documentals, en vídeos casolans, etc...

Pel què fa a la cartografia aèria, els drones més ben equipats compten amb control i posicionament GPS que permet fotografia i compondre mapes 3D d'un terreny de forma automàtica.

Prevenió i control d'incendis:

En el camp forestal els drones permeten el control constant de zones en alt risc d'incendi, o en cas d'incendi, de l'estudi de l'evolució del foc. Aquests tipus d'UAV poden dur a terme la tasca de forma autònoma tot transmetent les dades a qualsevol punt de control. Poden anar equipats amb GPS, càmeres de vídeo, infrarojos, etc... A part de l'important avantatge

² Les sigles UAV, Unmanned aerial vehicle, provenen de l'anglès i fan referència a tots els vehicles aeris no tripulats.

econòmic i tècnic que suposa poder dur a terme el control a vista d'ocell amb un aparell d'aquestes característiques, s'aconsegueix així dur a terme la tasca sense posar en perill cap vida humana.

Aplicacions militars:

Malauradament, la tecnologia utilitzada en els drones prové de fins militars. Així doncs, una altra de les aplicacions actuals d'aquesta tecnologia consisteix en tasques d'espionatge, rastreig, control de zones enemigues, i fins i tot, com a armes.

El món del radio control:

Un altre dels mercats en expansió dels drones és en el món del hobby. Cada vegada són més els drones radio control que es venen a nivell de joguina. N'hi ha de totes les mides, formes, potències i per a totes les edats.

El projecte té cabuda dins aquesta categoria. La idea no és donar-li cap aplicació concreta sinó treballar amb un nou disseny, de moment, radio control i prou. La tasca important ve en el disseny i el funcionament innovador d'aquest.

Altres aplicacions:

Hi ha moltes altres aplicacions més concretes amb les quals l'ús d'un drone facilita molt la tasca. En el cas del medi ambient, es pot parametritzar l'índex de contaminació lumínica per tal de crear mapes d'aquesta dada. Es pot fer seguiment d'accidents industrials, control d'abocament de residus tòxics, entre molts d'altres.

Pel què fa a l'agricultura, es poden automatitzar tasques de control d'arbres, reg, estat del fruit, temperatura, etc... La facilitat per desplaçar-se que tenens els drones faciliten molt totes aquestes tasques. Si totes aquestes aplicacions les dirigim al món de la geologia ens permeten realitzar mapes geològics, controlar explotacions mineres, avaluar impactes ambientals, etc...

En zones més urbanes la vista aèria d'un drone permet inspeccionar obres des de l'aire, fer estimacions de l'impacte que generen construccions de grans dimensions, controlar i analitzar multituds en el cas de concerts, manifestacions, etc... Investigació d'accidents, control de mobilitat i trànsit, entre molts d'altres.

5.3. Innovació:

Degut a l'enorme crescuda que ha vist el món dels drones recentment, el futur i la innovació que pot veure aquest camp a hores d'ara sembla il·limitat. El futur actualment passa per millorar el posicionament GPS i dotar aquests aparells dels suficients inputs d'informació com perquè puguin dur a terme un vol totalment autònom.

Un exemple clar n'és l'empresa de missatgeria Amazon. Recentment ha començat a difondre's la idea que volen començar a fer el repartiment de missatgeria via drone. Igual que en el camp de la missatgeria, des d'Holanda s'està treballant amb un drone carregat amb material mèdic. És el cas del drone desfibril·lador. Equipat amb més de 2Kg de càrrega, és un aparell ideal per arribar a punts de difícil accés i fer-ho amb molta més rapidesa. Aquest UAV va carregat amb un desfibril·lador i és capaç de diagnosticar i informar de l'estat de la víctima de l'infart de forma automàtica.

Hi ha molts altres casos d'aplicacions innovadores. Des de microdrones d'espionatge fins a drones de grans proporcions capaços de volar il·limitadament mitjançant l'ús de plaques fotovoltaiques. Una de les aplicacions que es volia a donar a aquests aparells és la d'emetre Wifi des de l'aire a zones de difícil accés.

Finalment tot i no ser un drone, ja que és pilotat, els últims anys s'ha desenvolupat l'E-volo. Tot i que està catalogat com el primer helicòpter elèctric de dos passatgers, utilitza per volar una tecnologia similar a la dels drones. Disposa de 18 rotors que li subministren la força suficient com per volar durant 1 hora a una velocitat de 100Km/h i transportar fins a 450 Kg. de càrrega. Segurament en un futur la tecnologia emprada en els drones es veurà aplicada també en el camp del transport de persones.

6. Fonaments

6.1. L'aerodinàmica que afecta els difusors:

En aquest apartat s'exposen detalladament els conceptes per tal d'entendre el funcionament de cada un dels difusors. Començaré tractant els fenòmens que apareixen quan interacciona un fluid amb una geometria concreta. Un cop presentat i introduïts en el llenguatge de la fluidodinàmica dividiré la part teòrica de funcionament dels difusors entre el que succeeix en l'interior dels difusors i en el seu exterior.

6.1.1. Introducció:

Quan un sòlid es mou en un fluid, apareixen unes forces que no es donarien si es desplaçés en el buit. Per el principi d'acció reacció, el cos exerceix una força sobre el fluid igual i de sentit contrari a la que el fluid exerceix sobre el sòlid. És a dir, el fenomen de la resistència que un sòlid experimenta al moure's dins un fluid, és fonamentalment igual al que experimenta un fluid al desplaçar-se per dins un sòlid. Així doncs, els principis i fonaments explicats a continuació ens serviran per tal d'analitzar les interaccions internes i externes del nostre difusor.

Les forces aparegudes entre el sòlid i el fluid en els dos casos anteriors es deuen a la viscositat d'aquest últim. Apareixen dos tipus de forces: la de sustentació, en la direcció normal al moviment i la d'arrossegament en direcció contrària a la trajectòria descrita. La paradoxa d'Alembert ens ajudarà a veure els efectes de la viscositat:

La paradoxa de d'Alembert:

Si un cilindre circular com el de la Figura 1 es mou amb una velocitat constant dins un fluid en repòs no tenim cap variació dinàmica. Anem a suposar que el fluid és ideal (viscositat $\eta=0$, energia constant en tots els punts tant d'una mateixa línia de corrent com de línies de corrent diferents).

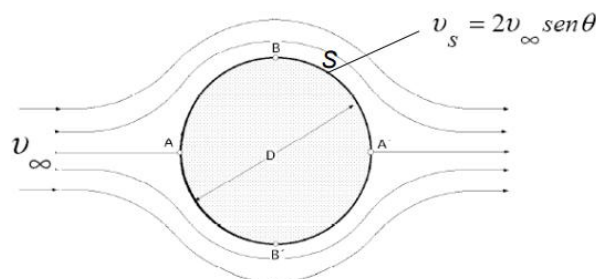


Figura 1: representació gràfica de la paradoxa d'Alembert

A partir d'uns càlculs dels qual no entrarem en detall l'Ec. 1 mostra que la velocitat en cada punt de la superfície és:

$$v_s = 2v_\infty \sin\theta$$

Ec. 1 expressió de la velocitat per a cada punt de la superfície

On:

$v_s \rightarrow$ Velocitat del fluid en un punt de la superfície del cilindre

$v_\infty \rightarrow$ Velocitat del fluid a l'infinít

$\theta \rightarrow$ Angle que descriu el punt del cilindre amb l'horitzontal.

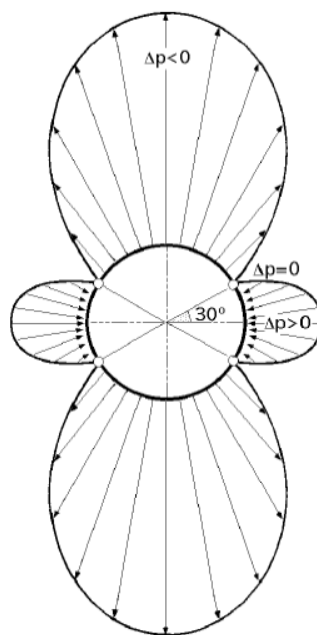


Figura 2: diagrama polar de pressions

El diagrama polar de pressions en el moviment descrit a la Figura 2 ens demostra com per simetria, les forces degudes a pressió respecte l'eix horitzontal (arrossegament) són nul·les.

Aquesta mateixa simetria ens indica que la força apareguda en la direcció normal al moviment (sustentació) és nul·la també.

La conclusió que s'extreu d'aquest diagrama és que un cilindre s'hauria de desplaçar dins un fluid ideal sense experimentar cap tipus de resistència. Aquesta aproximació teòrica l'hem fet partint de la base que el fluid en qüestió era ideal i per tant podíem considerar la viscositat com a nul·la. Ara bé, a la realitat, tot i que l'aigua i l'aire presenten una viscositat molt baixa, les resistències degudes a la força d'arrossegament que ens apareixen al voltant d'aquest cilindre són molt grans. Aquest fet s'explica de forma lògica amb l'aparició de dos nous conceptes; la capa límit i el desprendiment d'aquesta.

Des d'un punt de vista teòric, el moviment del fluid en contacte amb el cilindre descriu unes corbes representades en la Figura 3 a. Ara bé, si anem a mirar en detall el gradient de velocitats en un punt qualsevol de la superfície del cilindre, els vectors descriuen la forma mostrada en la Figura 3 b. Això significa que just en el punt més pròxim al cilindre la velocitat és 0. Aquesta velocitat augmenta ràpidament fins passada una pel·lícula molt fina. Aquesta pel·lícula mostrada també en la Figura 3 b és l'anomenada capa límit.

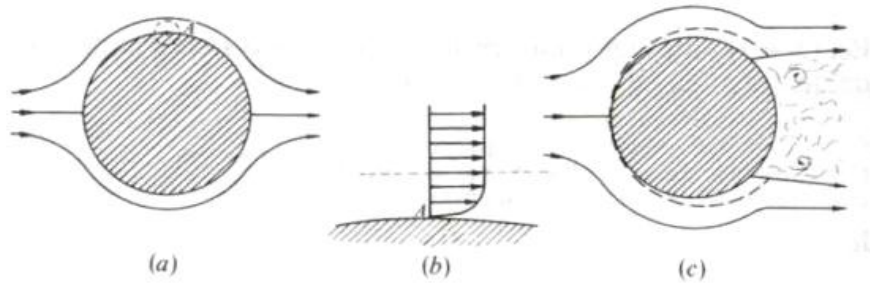


Figura 3: capa límit i el seu desprendiment

A la equació de Newton mostrada a continuació, η (viscositat de l'aire) és molt petita i per contra, $\frac{dv}{dy}$ és gran. Aquest fet implica que tot l'augment de velocitat té lloc en una pel·lícula molt fina, la capa límit.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

Ec. 2 equació de l'esforç tallant

La lletra τ de l'equació anterior és l'esforç tallant. Aquest esforç tallant s'anomena també resistència de superfície.

A la realitat, les línies de flux de la Figura 3 a només es donen en casos de velocitats molt baixes. La majoria de vegades el que s'esdevé és el que mostra la Figura 3 c. El desprendiment de la capa límit. Com es pot veure a partir d'un cert punt, la pel·lícula fina de fluid que anava totalment enganxada al sòlid, es desenganxa creant darrere el cilindre remolins que originen una depressió. Aquests remolins s'anomenen estela. Aquesta estela és la que frena el sòlid al desplaçar-se dins un líquid. Si el fluid estigués en repòs i el sòlid es mogué dins seu, aquest experimentaria una resistència anomenada resistència de forma.

La teoria de la capa límit troba la seva aplicació en fluids poc viscosos com poden ser l'aigua o l'aire. És per això que és una teoria fonamental en aerodinàmica i enginyeria naval. Anem a veure algunes característiques de la capa límit:

- El gruix d'aquesta capa és molt petit. De l'ordre de micres o mil·límetres.
- Aquest gruix va en funció de la viscositat del fluid. Més viscositat implica més gruix.
- Un líquid poc viscos es comporta com un fluid ideal amb excepció de la pel·lícula fina de la capa límit.

- Utilitzant el repartiment de velocitats i pressions per la teoria del fluid ideal en punts propers a la paret, es pot determinar l'evolució del fluid a la capa límit i els esforços exercits sobre la paret. Això es deu a que la pressió es transmet a través de la capa límit sense canviar la direcció, de forma que segueix sent normal a la superfície del sòlid.

En funció de com evoluciona la capa límit al costat d'un sòlid trobem dos tipus de règims. El règim laminar i turbulent.

El *règim laminar* es caracteritza per moure's de forma ordenada i estratificada. El fluid es mou separat per capes que no es barregen entre elles. La velocitat del fluid al costat de la paret és 0 i augmenta en funció del que es separa d'aquesta.

En *règim turbulent*, per contra, el fluid es comporta de forma caòtica. Les partícules es mouen desordenadament i les trajectòries de les partícules es creuen tot formant petits remolins aperiòdics.

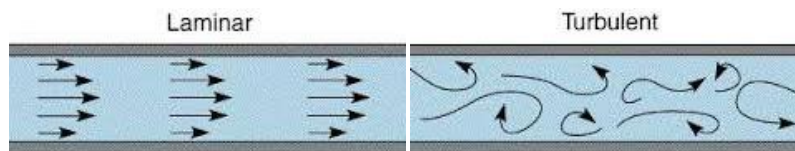


Figura 4: règim laminar i turbulent

Tal i com es mostra en la Figura 5, en funció de si el fluid es mou en règim laminar o turbulent, la seva distribució de velocitats a l'interior d'un tub pot prendre dues formes diferents:

- Distribució parabòlica. Es dona en règim laminar.
- Distribució irregular. Es dona en règim turbulent.

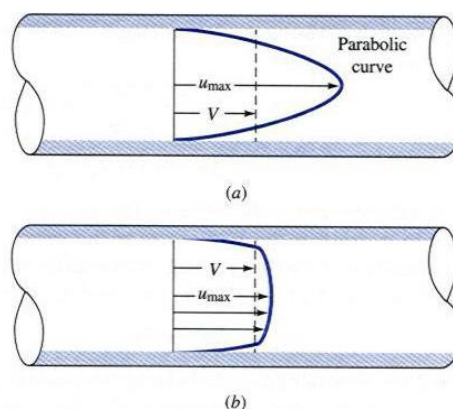


Figura 5: distribució de velocitats d'un fluid

Un altre paràmetre que ens ajuda a analitzar la resistència és el número de Reynolds. El número de Reynolds és un paràmetre adimensional lligat a la viscositat. Números de Reynolds elevats provoquen règims turbulents, per contra, si el Reynolds és petit garantim un règim laminar. Així doncs, existeix un número crític de Reynolds per sota del qual podem garantir

règims laminars. Aquest valor és de 2000. Dins d'un tub, el número de Reynolds depèn del diàmetre del tub D , de la viscositat cinemàtica del líquid ν , i de la velocitat de propagació del líquid v . L'expressió és la següent:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Ec. 3 expressió per al número de Reynolds

Tots aquests paràmetres apareixen a l'interior del difusor durant el seu funcionament. És molt important tenir-los controlats ja que tenen un efecte directe sobre les pèrdues de càrrega en el seu interior.

Un cop introduïts en la capa límit anem a veure'n el seu desprendiment. El desprendiment de la capa límit és el principal causant de la resistència de forma. Seguidament en veurem els seus efectes.

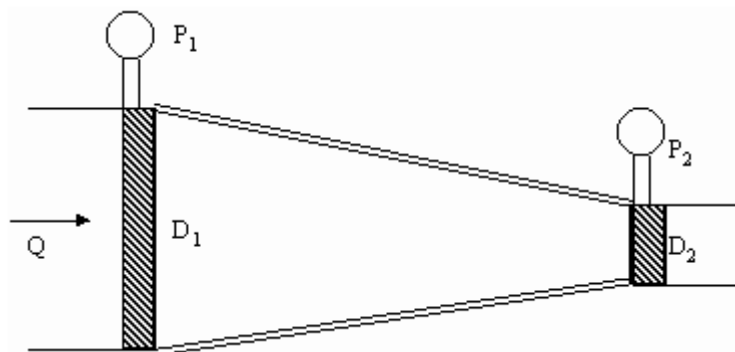


Figura 6: conducte de secció variable

Si tenim un conducte de secció variable com el de la Figura 6 on el fluid viatja d'esquerra a dreta, l'acceleració del fluid compensa la desacceleració que pateix per l'esforç tallant i s'oposa a l'augment de gruix de la capa límit. Si ara fem circular el fluid en la direcció inversa tenint així un conducte divergent, la pressió augmenta en la direcció de la corrent i el gradient de pressions s'oposa al moviment tot tendint a retardar el flux. Això es suma a l'efecte desaccelerador que provoca l'esforç tallant. En aquest cas la capa límit es separa de la paret del tub.

Com es pot veure a la Figura 7 el flux en les proximitats del contorn es va desaccelerant a causa de la viscositat fins al punt A on la velocitat és 0. Teòricament la forma del contorn exigiria encara una disminució de la velocitat més gran ja que allà el contorn és divergent. Com que això és impossible, el que fa el fluid en aquest punt és separar-se del contorn a l'hora que produeix un contraflux produït pel gradient de pressions advers. A la part dreta del sòlid, per sota la línia de desprendiment es crea una zona de baixes pressions. Aigües amunt la pressió serà més alta que aigües avall. Així doncs el cos submergit experimentarà una força F_p de dreta a esquerra que s'oposarà al moviment. Aquesta força és l'anomenada resistència de forma. La seva definició és la següent:

La resistència de forma és la produïda per una gradient de pressions advers que s'origina al desprendre's la capa límit. Aquesta depèn en gran mesura de la forma del contorn.

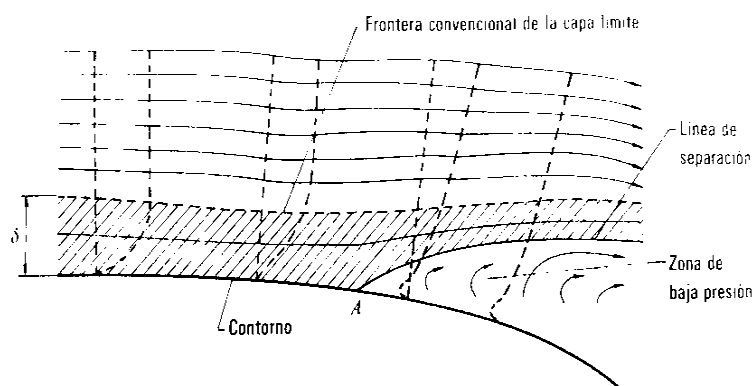


Figura 7: desprendiment de la capa límit

En forma de resum, la resistència de superfície està causada directament per la viscositat; la de forma en canvi, va en funció del gradient de pressions. És indirectament proporcional a la viscositat, que juntament amb la forma del contorn provoquen el desprendiment de la capa límit. És bàsic per el bon funcionament dels difusors saber quan interessa tenir la capa límit del fluid totalment enganxada a la paret, i quan per contra, ens convé que es desenganxi creant així turbulències.

Abans d'entrar en detall del què passa en els difusors anem a veure les pèrdues que es produeixen dins un conducte:

Dins un conducte existeixen fonamentalment dos tipus de pèrdues. Les anomenades primàries i secundàries. La pèrdues primàries són aquelles provocades pel contacte del fluid amb la superfície del tub. Per contra, les pèrdues secundàries tenen a veure amb la forma i els accessoris de la canalització, per exemple, colzes, canvis de diàmetre, etc...

Pèrdues primàries:

Per entendre a la pràctica com es traslladen les pèrdues dins un tub a la realitat, ho farem en forma d'exemple. Anem a suposar que tenim un tub horitzontal com el de la Figura 8.

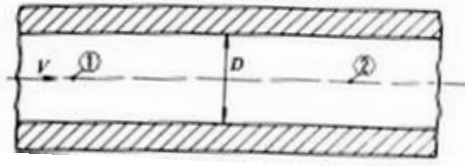


Figura 8: exemple gràfic de les pèrdues primàries

Aquest presenta un diàmetre constant D i una velocitat desconeguda v . L'energia que tenim en el punt 2 serà l'energia del punt 1 menys l'energia perduda entre 1 i 2. Matemàticament es complirà l'equació de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{r1-2} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Ec. 4 equació de Bernoulli aplicada al conducte de l'exemple

A la pràctica la manera com afectaran les pèrdues de càrrega serà en forma de pressió. Entre el punt 1 i el 2 tindrem una disminució de pressió.

Dos altres paràmetres que afecten la pèrdua de càrrega en un tub són, el règim en què es mou el fluid, i la rugositat de les parets. Com més rugoses són les parets més alta és la pèrdua de càrrega, alhora que si el fluid es mou en règim turbulent, la pèrdua de càrrega augmenta considerablement.

En el cas del difusors, degut a que la geometria és molt complexa, la pèrdua de càrrega l'extraurà directament de les simulacions realitzades.

Pèrdues secundàries:

Les pèrdues secundàries tenen lloc en canvis de secció i direcció del corrent com poden ser contraccions, colzes, vàlvules, etc... Aquests elements produeixen pertorbacions de corrent que originen remolins i desprendiments de la capa límit que intensifiquen les pèrdues. Tot i anomenar-se pèrdues secundàries, en el cas de conduccions curtes, aquestes poden ser molt més importants que les primàries. Per tal de donar valor a aquestes pèrdues existeix l'equació fonamental de les pèrdues secundàries:

$$H_{rs} = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Ec. 5 equació fonamental de les pèrdues secundàries

On:

$H_{rs} \rightarrow$ pèrdua de càrrega secundària

$\zeta \rightarrow$ Coeficient adimensional de la pèrdua de càrrega

$v \rightarrow$ Velocitat mitjana a la tuberia.

A l'hora de calcular les pèrdues secundàries en un conducte el que es fa és afegir una equació de pèrdua de càrrega secundària per a cada un dels punts conflictius. Cada un d'aquests punt porta associat un coeficient adimensional de pèrdua de càrrega adaptat a la forma estudiada. Els valors de ζ venen a partir de taules en funció de la forma.

Seguidament veurem com afecten els fonaments esmentats en el disseny del difusor creat.

6.1.2. L'interior del difusor

Aquest apartat pretén explicar des d'un punt de vista teòric que succeeix en l'interior del difusor per tal de garantir-ne un bon funcionament. Començaré presentant-vos la geometria dels difusors. Com es pot veure en la **figura** cada un dels difusors consta de dues parts principals. La conducció en forma de colze de l'entrada d'aire i el difusor pròpiament dit.

1.- Colze d'entrada.

2.- El difusor

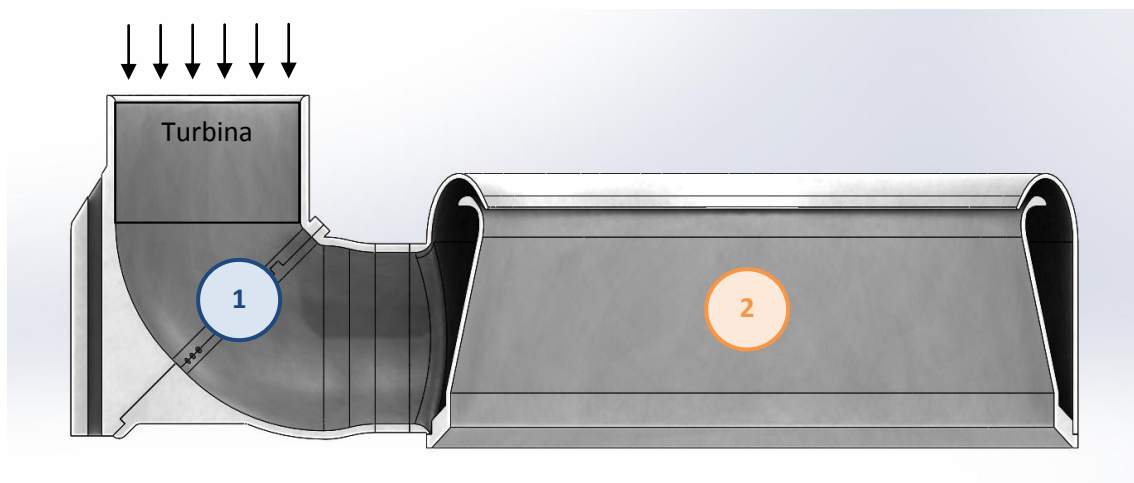


Figura 9: secció del difusor objecte d'estudi

El colze d'entrada té la funció de dirigir l'aire cap a l'interior del difusor. Consta d'una turbina situada en la part superior del colze amb la finalitat principal de propulsar l'aire cap a l'interior del difusor. La posició de la turbina és en vertical per tal d'aprofitar la petita depressió que creen les aspes al desplaçar l'aire. Proporciona una petita ajuda pel què fa a la sustentació. Tot i així, el motiu principal que m'ha fet optar per aquesta situació és que si la turbina hagués estat col·locada de forma horitzontal, aquesta depressió hauria fet perillar-ne la seva estabilitat tot fent-lo avançar en la direcció de la depressió. Vegeu el disseny a la Figura

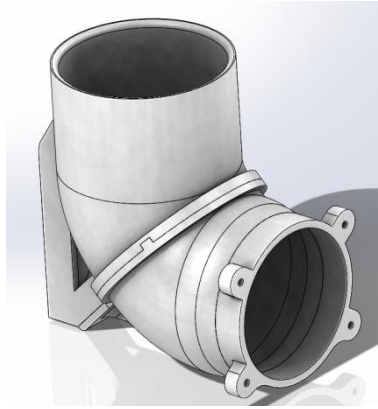


Figura 10: disseny del colze

A nivell individual per garantir el millor funcionament del colze d'entrada, el què busco és minimitzar les pèrdues secundàries en la corba i disminuir al màxim la velocitat en forma de pressió per tal de baixar el número de Reynolds. Al baixar el número de Reynolds del conducte baixaran les turbulències, i conseqüentment les pèrdues de càrrega.

El difusor és la part més crítica del sistema de propulsió del drone. És aquí on tenen lloc les pèrdues de càrrega més elevades degut a la geometria de la peça. En primer lloc es força l'aire a xocar contra una paret per tal de distribuir el cabal en dos. A partir d'aquest punt el cabal, de forma simètrica circula per l'interior del difusor tot essent forçat a sortir per la petita obertura mostrada en la Figura 11.



Figura 11: disseny del difusor

Durant aquest recorregut es tracta de minimitzar al màxim les pèrdues de càrrega. Aquesta disminució de les pèrdues passa per evitar canvis sobtats de direcció, baixar la velocitat de l'aire en el seu interior i aconseguir la mínima rugositat.

En la Figura 12 es veu el recorregut que pren l'aire a l'interior del difusor.

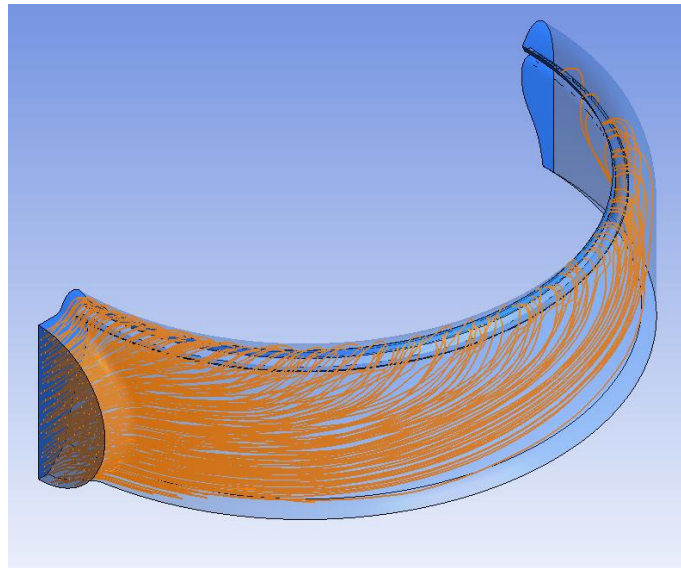


Figura 12: recorregut de les partícules d'aire dins el difusor

La imatge anterior mostra un anàlisi del recorregut que prenen les partícules en l'interior del difusor. Ha estat extreta d'una de les simulacions fetes amb l'Ansys. Per aconseguir una força de sustentació al màxim uniforme a la sortida és interessant aconseguir una velocitat de sortida al màxima uniforme a tota la obertura circular.

6.1.3. L'exterior del difusor

És a l'exterior del difusor on succeeix el fonament d'aquest tipus de propulsió innovador. L'efecte Venturi. L'efecte Venturi es dona en molts dels camps de la fluidodinàmica. Té una gran varietat d'aplicacions. Tot i així l'aplicació que li donarem en el nostre cas és un menys habitual. Comencem definint i donant quatre nocions bàsiques sobre aquest efecte.

L'efecte Venturi es dona quan un fluid varia la seva velocitat degut a una disminució de la secció de la geometria que l'envolta. Quan això s'esdevé, el fluid augmenta la velocitat tot perdent pressió. L'equació de Bernoulli per a una mateixa línia de corrent pren la següent forma:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + P = \text{cnt.}$$

Ec. 6 equació de Bernoulli per a una mateix línia de corrent

On:

$v \rightarrow$ és la velocitat

$\rho \rightarrow$ és la densitat

$h \rightarrow$ és l'alçada

$P \rightarrow$ és la pressió

Per altre banda sabem que en una canonada el cabal d'aigua que entre és el mateix que el que surt. Així doncs:

$$Q = v \cdot S$$

Ec. 7 definició del cabal

On:

$Q \rightarrow$ és el cabal

$v \rightarrow$ és la velocitat

$S \rightarrow$ és la secció

D'aquesta equació s'extreu que si ha de passar la mateixa quantitat de fluid per la part ampla i per la part estreta, el que passi per la part estreta ho haurà de fer més ràpid.

Sense ser-ne conscients estem molt familiaritzats amb aquest efecte. Per exemple, moltes vegades (sobretot a l'interior de les cases) deixem portes obertes i veiem com amb una mica de corrent d'aire es tanquen amb un bon cop. L'explicació d'aquest fenomen es deu a l'*efecte Venturi*.

El corrent d'aire entra per la porta; depenent de com està la porta a la part del darrere hi pot haver aire en repòs. El corrent que passa per un costat de la porta té una velocitat mentre que l'aire del darrere està quiet. Això fa que la pressió a la part frontal sigui menor que la del darrere i si les condicions hi acompanyen aquesta diferència farà que la porta comenci a tancar-se. Mentre es tanca la secció per la que entra l'aire es fa més petita i per tant la velocitat d'entrada augmenta i si $v \uparrow \Rightarrow P \downarrow$ és a dir que a mesura que es tanca la porta la diferència de pressió entre els dos costats augmenta i fa que la porta es tanqui més ràpid, és un procés que es retroalimenta fins que es tanca amb un bon cop.

Més tècnicament aquest procés s'utilitza en dispositius que requereixin un poder de succió important. S'entén molt bé en la Figura 13. Com es pot veure el canvi de secció de la imatge provoca una variació de la velocitat. Com hem comentat anteriorment aquesta variació de la velocitat provoca una depressió en la part on la secció és més estreta. Aquest canvi de secció provoca que la depressió tingui lloc en l'entrada prima del punt 2 en la direcció de la fletxa taronja. Aquesta depressió es veu transformada en força de succió en el punt 3.

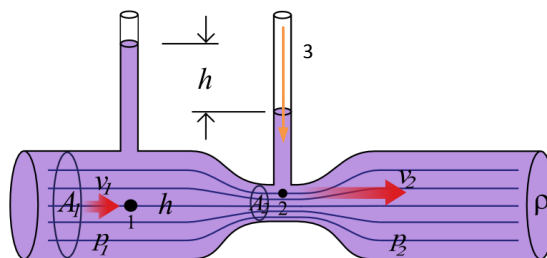


Figura 13: esquema de funcionament de l'efecte Venturi

El procés explicat en la imatge anterior és el que interessa aconseguir just en la sortida del difusor.

Anem a veure que succeeix a la sortida del difusor. Ens ho mostra la Figura 14. Jugant amb l'obertura de sortida circular es tracta d'aconseguir la màxima velocitat de sortida. En l'interior del punt A es converteix la pressió en velocitat ja que es força l'aire a passar una zona de secció més petita. És just aquí on, tal i com he explicat anteriorment, per l'efecte venturi es crea una depressió capaç de xuclar l'aire que prové de l'exterior del difusor.

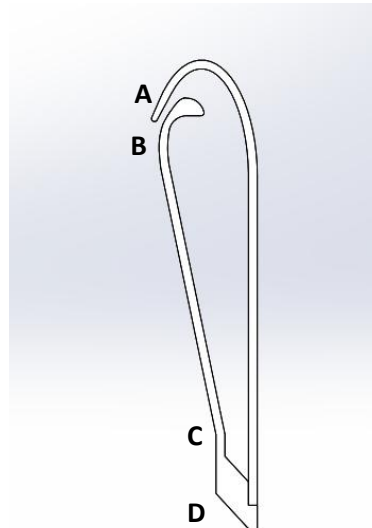


Figura 14: sortida del difusor

L'aire en el moment que surt projectat pel difusor s'adhereix a la paret tot resseguint-la de B a C. És aquí on apareixen els conceptes explicats anteriorment sobre la capa límit. En aquest trajecte és vital que la capa límit sigui al màxim laminar. Tot arribant en aquest estat al punt C. Just al punt C es produeix un canvi de direcció del flux. Aquest canvi té com a objectiu dirigir l'aire de forma vertical cap avall. Finalment just en D la capa límit es desprèn de forma brusca de la paret del difusor tot projectant l'aire.

El principal avantatge que mostra aquest tipus de difusor és la capacitat de crear una depressió en A que arrossega molt més volum d'aire del que entra al difusor. Fet d'aquesta forma teòricament s'aconsegueix moure una quantitat d'aire més gran de la que mou la turbina tot proporcionant així una major força de sustentació. El que succeeix en el pla anterior passa en cada un dels plans que formen la geometria de la peça mostrada a la Figura 15. Així doncs el que s'assoleix és una columna d'aire constant que crea una força de reacció contrària a la direcció cap on es projecta. Així doncs, si els difusors estan encarats cap avall es crea una força cap amunt. La de sustentació del drone.

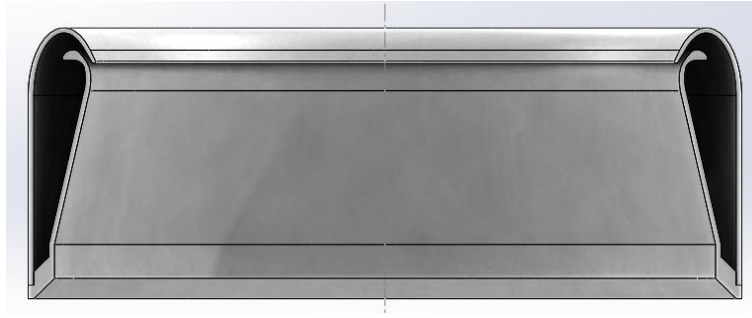


Figura 15: secció on es mostren l'interior del difusor

6.1.4. Control del drone

En aquest punt anem a fer un petit estudi sobre com funcionaria el control del drone. Des d'un punt de vista estructural el quadricòpter presenta la forma mostrada en la Figura 16. Consta de quatre bolcs de propulsió alimentats cada un amb una turbina. Com que cada un dels blocs provoca una força no alineada amb el centre, aquestes provoquen la inclinació del quadricòpter. Les lletres minúscules en la imatge corresponen a la posició de les quatre turbines. Per altra banda, les majúscules són els punts de sortida d'aire gràcies a l'efecte Venturi.

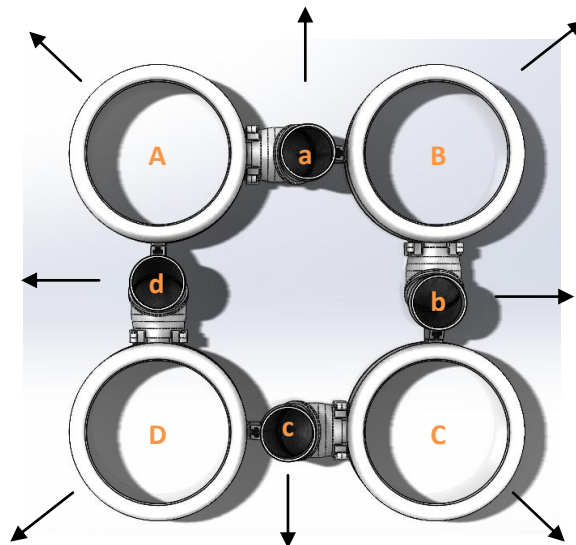


Figura 16: control del drone

Partim del següent principi de funcionament: una major velocitat en la turbina situada en a, per exemple, provoca una major força de sustentació en A. Així successivament amb els altres difusors.

Així doncs, per tal de dirigir el drone cap a una de les 8 direccions bàsiques de la imatge jugarem amb les diferents relacions de velocitat de les turbines i les relatives forces de sustentació que generen cada un dels difusors. Per facilitar l'exemple les turbines poden

realitzar dues accions diferents. Mantenir o augmentar la velocitat. La simbologia de les dues accions descrites la podeu veure a la Taula 1.

=	La velocitat de la turbina es manté constant. Conseqüentment augmenta la força de sustentació en el difusor.
+	La velocitat de la turbina és més alta en relació a les altres tot provocant una inclinació del drone.

Taula 1: simbologia de les accions que pot dur a terme una turbina

La Taula 2 mostra quin ús hem de fer de les turbines per tal d'aconseguir dirigir el drone cap una de les direccions de la columna esquerra.

Direcció	Turbina a	Difusor A	Turbina b	Difusor B	Turbina c	Difusor C	Turbina d	Difusor D
↑	=		=		+		+	
↓	+		+		=		=	
→	+		=		=		+	
←	=		+		+		=	
↘	+		=		=		=	
↖	=		=		+		=	
↙	=		+		=		=	
↗	=		=		=		+	

Taula 2: taula de funcionament del drone

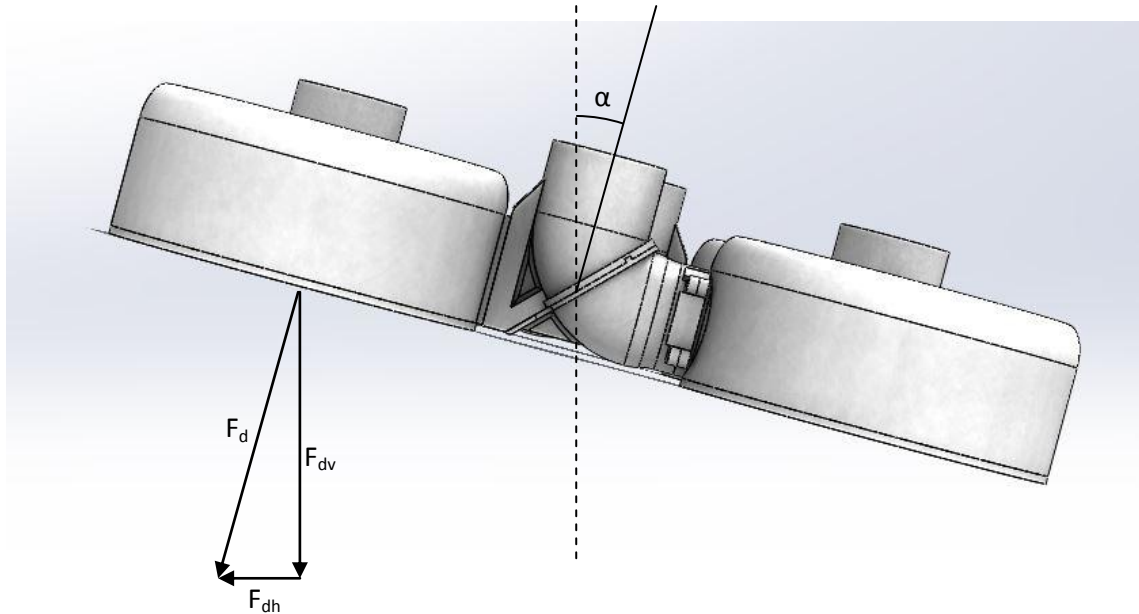


Figura 17: forces aparegudes a l'hora d'inclinar el drone

Un cop tenim el drone inclinat degut a forces de diferent valor en cada un dels propulsors, el quadricòpter es desplaça. En el cas de la Figura 17 el drone es desplaçaria lateralment cap a la dreta. Aquest desplaçament és degut a la resultant de les forces que apareixen. Com es pot veure la força de l'aire segueix essent perpendicular al difusor. La de reacció a causa de la força de l'aire és la que provoca la sustentació. En aquest cas podem dividir la força de l'aire en dues components. La component horitzontal i la vertical.

Si el drone s'inclina un angle α les dues components prenen els següents valors:

$$F_{dv} = F_d \cdot \cos \alpha$$

Ec. 8 expressió de la força en la direcció vertical

$$F_{dh} = F_d \cdot \sin \alpha$$

Ec. 9 expressió de la força en la direcció horitzontal

És important tenir en compte que en el moment en que inclinem el drone perd part de la sustentació que té si el tenim en posició horitzontal. La part de força que perdem es tradueix en una força horitzontal que és la que fa avançar el drone. Tal i com he dit ja, en el cas de la imatge anterior el drone avançaria cap a la dreta, direcció contrària a la força horitzontal que provoca l'aire.

6.2. Disseny mitjançant *Solidworks*

El *Solidworks* és un programa de disseny tridimensional que permet el modelatge de peces, la creació d'assemblatges, planells i d'altres aplicacions concretes com són la simulació en varis camps.

El seu entorn de treball es basa en tres tipus de dissenys diferents:

- Les peces: el disseny de peces es basa en la creació de figures a partir de croquis en dues dimensions. Els documents amb aquest format utilitzen l'extensió .SLDPRT. Un cop realitzat el croquis dones volum a la peça mitjançant una gran varietat d'operacions. Les més habituals en aquest projecte són la revolució, l'extrusió, el tall, etc... Una altra de les eines interessants del bloc de creació de peces és l'edició dels materials. *Solidworks* porta integrat un banc de materials molt ampli per tal de donar propietats físiques i estètiques a les peces creades.
- Assemblatge: els documents d'assemblatge utilitzen l'extensió .SLDASM i són la base per treballar amb més d'una peça a l'hora. Permeten l'importació d'un número il·limitat de peces al seu entorn de treball. Un cop importades es treballa mitjançant la relació de posició entre elles. Les relacions de posició més emprades en aquest projecte són les de conicitat, contacte, alineament entre eixos, etc... Des dels documents d'assemblatge es pot treballar i editar l'aparença de les peces, els materials, propietats mecàniques, etc... És des dels assemblatges on es criden els varis mòduls de simulació que té *Solidworks*. En l'apartat de simulació explicaré el que he utilitzat per tal de simular com reacciona el drone quan és sotmès a unes determinades càrregues. El bloc de simulació en qüestió s'anomena *Solidworks Simulation*.
- Els planells: una altra de les aplicacions molt potents de les quals disposa *Solidworks* és la confecció de planells de forma automàtica. A partir d'una peça dibuixada en 3 dimensions pots inserir les seves vistes i acotar-les. A part de l'acotació pots treballar amb toleràncies, talls, vistes de secció, mecanitzats, etc...

Per a la transferència d'arxius de CAD entre els diversos programes que he utilitzat en el projecte he fet servir els formats .STEP i .STL. Són formats que discretitzen els sòlids en triangles per tal de guardar-ne la geometria. Veure en els apartats 5.3.1. *Ansys Fluent* i al 5.4.3. *Procés d'impressió*.

6.3. Simulació

En aquest apartat explicaré les bases dels dos tipus de simulacions que he dut a terme en el projecte. En primer lloc parlaré de l'*Ansys* i en concret del *Fluent*, programa que he utilitzat per dur a terme les simulacions aerodinàmiques dels difusors. En segon lloc explicaré el funcionament del *Solidworks Simulation*, un complement del programa de disseny de CAD *Solidworks*, que permet fer anàlisis estructurals de les peces.

6.3.1. *Ansys Fluent*

El programa que he utilitzat per realitzar totes les simulacions dels difusors és l'*Ansys*. En concret he fet servir un mòdul de càlcul anomenat *Fluent*. En aquest punt us parlaré de forma molt descriptiva del funcionament i els mètodes numèrics que utilitza *Fluent* i sobretot em centraré en el mètode general emprat en les simulacions dutes a terme.

El software d'*Ansys Fluent* conté les amplies característiques de modelatge físic que es necessiten per modelar fluxos, turbulències, transferències de calor i reaccions per aplicacions industrials que van des de fluxos d'aire sobre una ala d'avió, passant per la combustió en un forn, anàlisi de les columnes de bombolles de les plataformes petrolieres, i acabant, per exemple, amb el disseny d'una sala blanca d'una planta de tractament d'aigües residuals. Utilitza models especials que donen al software la capacitat de modelar sistemes de combustió dins un cilindre, models aeroacústics, turbo maquinària y models multi fase. D'aquesta amplia gamma d'aplicacions en aquest projecte em centraré en l'anàlisi aerodinàmic de certes geometries. Els difusors. Començaré amb els fonaments de càlcul d'*Ansys*.

Les equacions de Navier-Stokes:

Seguidament mostraré la forma de les equacions tridimensionals de Navier-Stokes. Aquestes equacions descriuen com estan relacionades la velocitat, la pressió, la temperatura i la densitat d'un fluid en moviment. Provenen d'extensions de les equacions d'Euler i inclouen efectes de la viscositat d'un fluid.

Les equacions de Navier-Stokes són un conjunt d'equacions diferencials que, teòricament, es podrien resoldre a mà mitjançant mètodes de càlcul. A la pràctica aquestes equacions són massa difícils de resoldre analíticament. En el passat els enginyers duien a terme simplificacions i aproximacions per tal de resoldre aquestes equacions. Més recentment, s'utilitzen els ordinadors per resoldre aquestes aproximacions utilitzant tècniques com són la diferència finita, el volum finit, els elements finits, etc... Aquesta àrea d'estudi és l'anomenada *Computational Fluid Dynamics* o CFD.

Les equacions de Navier-Stokes consisteixen en una equació de la conservació de la massa en el temps, tres equacions de la conservació dels moments dependents del temps i una altra

equació de la conservació de l'energia. Aquest també depèn del temps. En el sistema hi trobem quatre variables independents, les 3 coordenades espacials X , Y i Z , i el temps t . A part hi ha sis variables dependents: la pressió p , la densitat ρ , la temperatura T , i tres components de la velocitat (u , v , w , una en cada eix). Totes les variables dependents són funció de les quatre variables independents. Les equacions diferencials són, per tant, equacions diferencials parcials. Les equacions esmentades són les següents:

Continuïtat:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho \cdot u)}{dx} + \frac{d(\rho \cdot v)}{dy} + \frac{d(\rho \cdot w)}{dz} = 0$$

Ec. 10 equació de la continuïtat

Els 3 moments:

$$X \rightarrow \frac{d(\rho \cdot u)}{dt} + \frac{d(\rho \cdot u^2)}{dx} + \frac{d(u \cdot v)}{dy} + \frac{d(u \cdot v \cdot w)}{dz} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} \right]$$

Ec. 11 equació del moment en la direcció X

$$Y \rightarrow \frac{d(\rho \cdot v)}{dt} + \frac{d(\rho \cdot u \cdot v)}{dx} + \frac{d(p \cdot v^2)}{dy} + \frac{d(\rho \cdot v \cdot w)}{dz} = -\frac{dp}{dy} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} \right]$$

Ec. 12 equació del moment en la direcció Y

$$Z \rightarrow \frac{d(\rho \cdot w)}{dt} + \frac{d(\rho \cdot u \cdot w)}{dx} + \frac{d(\rho \cdot v \cdot w)}{dy} + \frac{d(p \cdot w^2)}{dz} = -\frac{dp}{dz} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} \right]$$

Ec. 13 equació del moment en la direcció Z

Energia:

$$\begin{aligned} & \frac{d(E_t)}{dt} + \frac{d(uE_t)}{dx} + \frac{d(vE_t)}{dy} + \frac{d(wE_t)}{dz} \\ &= -\frac{d(u \cdot p)}{dx} + \frac{d(v \cdot p)}{dy} + \frac{d(w \cdot p)}{dz} - \frac{1}{Re_r \cdot Pr_r} \left[\frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} \right] \\ &+ \frac{1}{Re_r} \left[\frac{d}{dx} (u \cdot \tau_{xx} + v \cdot \tau_{xy} + w \cdot \tau_{xz}) + \frac{d}{dy} (u \cdot \tau_{xy} + v \cdot \tau_{yy} + w \cdot \tau_{yz}) \right. \\ &\left. + \frac{d}{dz} (u \cdot \tau_{xz} + v \cdot \tau_{yz} + w \cdot \tau_{zz}) \right] \end{aligned}$$

Ec. 14 expressió de l'energia

On Re és el nombre de Reynolds. Les variables Q són els components de flux de calor i Pr és el nombre Prandtl. Les variables τ són components del tensor de tensions. Un tensor es genera quan es multipliquen dos vectors d'una manera determinada. El vector de velocitats té tres

components i el tensor de tensions en té nou. Cada component del tensor de tensions és en si mateix una segona derivada dels components de la velocitat.

Així doncs, el procés de càlcul dels programes CFD es dediquen a donar valor a cada una les incògnites anteriors per a cada instant de temps. Un cop donats valors a cada un dels nodes es recalculen a partir dels resultats donats fins a arribar a complir un número determinat d'iteracions, o fins que la solució convergeix.

El funcionament del programa per a les simulacions dutes a terme:

A l'hora de realitzar les simulacions del projecte el procés a seguir ha estat el següent. En obrir l'Ansys pots triar amb quin mòdul de càlcul treballar. En aquest cas triem el *Fluent*. El primer pas per a qualsevol simulació és entrar la geometria de la peça. Hi ha varies maneres de treballar amb les geometries. Pots dibuixar-les des del programa mateix o importar-les. Com que els dissenys del difusor els he fet amb el *Solidworks* he treballat amb una geometria importada. Un dels factors a tenir en compte a l'hora de crear la geometria, sigui des de l'Ansys o bé des del Solidworks, és que amb el que treballarem no és amb la peça, en aquest cas de plàstic, sinó amb el volum d'aire contingut en el seu interior. Aquest serà el nostre volum de control. Un cop importada la geometria només ens cal generar-la. Un cop generada podem passar al següent pas. El bloc de mallat.

Quan iniciis el bloc de mallat el primer pas és definir les condicions de contorn del volum d'aire a analitzar. Seleccionem les diferents parts de la peça per definir les entrades i sortides d'aire i el fluid. Hi ha una forma concreta d'anomenar cada una d'aquestes parts. És important definir les entrades i sortides utilitzant variables diferents. En el nostre cas parlem de velocitats d'entrada, *velocity inlet* en el programa, pressions de sortida, *pressure outlet*, i volum d'aire del *fluid*. Un cop definits s'inicia pròpiament dit el mallat.

Mallar una figura consisteix en dividir-la, en el nostre cas, en triangles de forma que el programa pugui calcular en cada un dels seus nodes. Un mallat molt fi implica un ordinador molt potent, i si aquest ho suporta, temps de càlcul molt elevats. Tal i com he comentat en el punt anterior, en cada un d'aquests nodes el programa hi aplicarà i resoldrà les equacions de Navier-Stokes, així doncs, com més nodes tingui la geometria més vegades haurà de resoldre les equacions. Per contra, si fem un mallat molt gran els resultats seran poc precisos ja que una superfície molt gran la considerarà com a un mateix punt amb una mateixa solució. Així doncs es tracte de trobar l'equilibri entre temps de càlcul i precisió. A l'hora d'ajustar-la treballes amb mida màxima i mínima de cada un dels triangles.

Fins aquí el procediment és igual en qualsevol programa de simulació per elements finits. És a partir d'aquest pas on es comencen a introduir els models aerodinàmics a calcular. Un dels passos fonamentals és l'elecció del model de turbulències. El més utilitzat és el k- ϵ . Tal i com ja he esmentat en els fonaments de la fluidodinàmica del treball, sempre que treballem amb

valors del número de Reynolds superiors a 2000 estarem treballant en règim turbulent. A la realitat, en la gran majoria dels casos es treballa en règim turbulent, així doncs és fonamental tenir un model que simuli aquestes turbulències. Aquest és el k- ϵ . Seguidament en mostro unes quantes característiques:

El model k- ϵ :

- El model estàndard k- ϵ (SKE) és el més utilitzat per simular turbulències en enginyeria a nivell industrial.
- Els paràmetres del model es calibren a partir d'un gran nombre d'experiments com ara fluxos en canonades, fluxos incidint sobre una placa plana, etc...
- És un model robust i alhora raonablement precís. És per això que presenta un gran nombre d'aplicacions.
- És un model poc apropiat per a canonades de gran longitud.

Un cop entrat el model de turbulències es defineixen les característiques del fluid. En el nostre cas l'aire. Seguidament es dona valor a les velocitats d'entrada o sortida del model, així com pressions, temperatures, etc... si és necessari. El nostre cas només treballem amb gradients de velocitat i pressions. Un cop introduïdes totes les característiques del model a simular s'inicialitza el càlcul. Si hi ha algun error el mateix programa el mostra. Acte seguit et dona la possibilitat de modificar-lo. Un cop inicialitzat, tant sols introduint el nombre d'iteracions a calcular, i prement el botó calcular comença el procés. En funció del nombre de nodes, dificultat del model i nombre d'iteracions els càlculs triguen més o menys estona. Cadascuna de les simulacions fetes constava de 300 iteracions i el temps de càlcul era d'entre 1 i 2 hores.

Un cop realitzats els càlculs es prossegueix amb la visualització dels resultats. Inicialment el programa no mostra cap resultat. Manualment se li ha d'anar indicant què vols veure. Les operacions que he fet servir més són les gràfiques de velocitat situades en un pla de la peça, la visualització dels vectors en un dels plans creats i les *streamlines*. Les *streamlines* són dibuixos del recorregut de les partícules d'aire dins el model. Són molt pràctiques per veure si el flux d'aire és el desitjat i si en algun punt es creen contra fluxos o petits remolins. Finalment, l'altra eina que he utilitzat per tal d'avaluar velocitats mitjanes i gradients de pressions en punts concrets són les funcions següents:

Velocitat mitjana de sortida:

- `areaAve(Velocity)@OUTLET`

Gradient de pressions:

- `areaAve(Pressure)@INLET-areaAve(Pressure)@OUTLET`

La velocitat mitjana m'ha servit per tenir una idea de la uniformitat de la velocitat a la sortida i el gradient de pressions per saber la pèrdua de càrrega que suposava la geometria del difusor. Ha sigut el paràmetre bàsic per analitzar el funcionament del meu model.

6.3.2. *Solidworks Simulation*

La simulació per elements finits és un mètode numèric per a la solució de problemes comuns en enginyeria. Permet resoldre problemes que involucren un grau de complexitat molt elevat degut a la geometria, a les matemàtiques que s'apliquen per resoldre, a les càrregues distribuïdes no uniformement, etc... a part permet treballar amb propietats de materials de forma senzilla. En general donen solució a problemes amb els que generalment no podem obtenir una solució analítica directament d'expressions matemàtiques.

En el nostre cas l'he utilitzat per tal de determinar la rigidesa de l'estructura del drone quan es veu sotmès a càrregues similars a les de funcionament.

El funcionament del mètode d'elements finits planteja un problema com si fos una sèrie d'equacions algebraïques simultànies. Aquestes troben solucions aproximades en un número finit de localitzacions dins el cos. Les localitzacions depenen del número d'elements utilitzats per la discretització de la peça. La discretització és el procés de modelació d'un cos que consisteix en la divisió equivalent del mateix en un sistema format per cossos més petits, elements finits, interconnectats mitjançant nodes. Aquests formen superfícies i es comporten com volums de control independents. A l'hora de calcular el resultat, el programa analitza cada un d'aquests elements simultàniament i s'obtenen resultats de tota la peça a partir dels resultats individuals.

Introducció a la notació matricial:

El següent apartat no pretén aprofundir a les bases de la matemàtica matricial, sinó entendre què fa el programa a l'hora de calcular i donar una visió general d'alguns conceptes útils per la interpretació dels resultats.

Els mètodes matricials són una eina imprescindible quan es parla del mètode d'elements finits ja que degut a la gran quantitat d'equacions emprades és necessari dur a terme una simplificació. Aquesta simplificació, precisament, és fa mitjançant matrius.

Generalment quan s'analitza un problema estructural s'analitzen els esforços que presenta la peça en aplicar-li unes forces externes, així com els desplaçaments que mostra cada un dels seus punts, és a dir, les deformacions. El primer concepte que trobem és la matriu de rigidesa. Aquesta rep el nom K . Relaciona les coordenades locals del desplaçament D quan es veuen afectades per una força F . Aquesta matriu s'aplica a cada un dels elements creats en el procés de discretització.

$$\{F\} = [K] \cdot \{d\}$$

Ec. 15 equació de la matriu de rigidesa

Procediment de càlcul en el *Solidworks Simulation*:

El *Solidworks Simulation*, al ser un complement del *Solidworks* permet, un cop dissenyada la peça, realitzar petits càlculs i comprovacions per tal de comprovar-ne la rigidesa. És per aquest motiu que el complement prescindeix de tota la part de creació de la geometria. Es parteix de la geometria creada amb el *Solidworks*.

Per començar a treballar amb el programa de càlcul estructural, un cop definida la geometria carreguem el mòdul de càlcul. Aquest mòdul de càlcul té un entorn de treball molt similar al de *Solidworks*, fet que en facilita el funcionament.

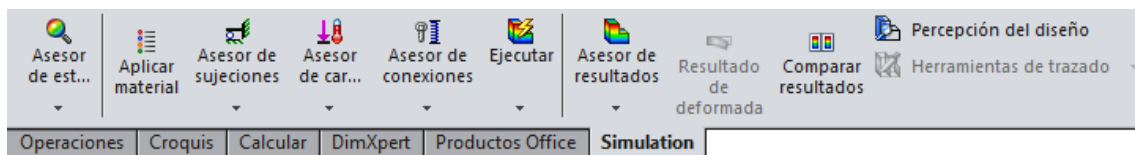
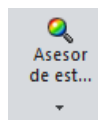
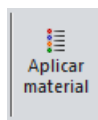


Figura 18: barra d'eines de *Solidworks*

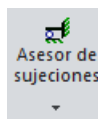
El menú de treball que es desplega és el de la Figura 18. És un menú molt intuïtiu ja que per tal de calcular només cal seguir ordenadament d'esquerra a dreta les opcions mostrades a la Figura 8.



L'assessor de l'estudi permet definir opcions prèvies del càlcul a realitzar. Et permet introduir variables com la temperatura, la fricció, etc... configurar velocitats de càlcul, i la seva exactitud. En el moment de fer clic sobre la opció nou estudi, es despleguen els diversos tipus d'estudis que es poden realitzar. El que durem a terme nosaltres és l'estudi estàtic. Quan carreguem el complement per tal de començar a simular totes les opcions de la barra d'eines general es mostren de color gris fent que no les puguem utilitzar. És en el moment de definir l'estudi que faràs quan s'activen totes les altres opcions.



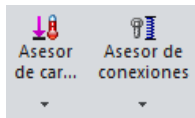
És en aquest opció on es desplega una base de dades de materials comuns per el càlcul estructural. En el nostre cas utilitzem el ABS PC. Totes les propietats d'aquest material es carreguen en el moment de triar el plàstic. Una de les opcions interessants és que li pots triar el patró intern³ que ha utilitzat la impressora a l'interior de la peça.



Un cop definit amb quin material estem treballant és el moment d'entrar les condicions de treball del model. La primera opció que ens apareix és triar si volem crear una subjecció o un contacte. En el nostre cas, com que sempre partim d'una

³ Veure tipus de patrons a l'apartat 5.4.2. *BCN 3D+*

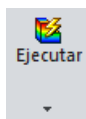
peça sòlida el que creem és una subjecció. Es tracta de definir una part de la peça com a fixa, la que li hem afegit la subjecció, i la resta mòbil.



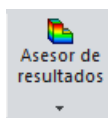
Seguidament afegim les interaccions que decidim simular. Per fer-ho utilitzem el menú assessor de càrregues i assessor de connexions. Aquest últim ens permet veure com interactuen una peça amb una altra. Hi ha diverses opcions:

- Agregar un suport o una subjecció
- Agregar un moviment definit
- Agregar una càrrega
- Agregar un connector
- Agregar un contacte
- Unir de sòlids mitjançant una soldadura
- Unir dos sòlids amb una unió rígida/adhesiu

Per dur a terme aquest simulació afegirem càrregues i les aplicarem en els punts on apareixerien durant el funcionament del drone. Per fer-ho es selecciona la part del drone on aplicarem la càrrega i s'introdueix la magnitud d'aquesta. Les unitats emprades són el Newtons.



Un cop introduïdes les opcions anteriors podem procedir a llançar el càlcul. En el moment de llançar el càlcul el Solidworks, de forma automàtica, genera una malla. Un cop generada es posa a buscar la solució del problema plantejat. Un cop resolt t'indica el desplaçament màxim del model per tal de comprovar si el resultat és coherent. En el cas que ho sigui es salta a l'assessor de resultats. Si no ho és et permet tornar al pas de les interaccions per comprovar els valors entrats.



L'últim pas és l'assessor de resultats. És des d'aquí on es mostren les 3 magnituds més bàsiques a l'hora d'analitzar les tensions que apareixen en una peça sota unes forces de càrrega determinades. Aquestes són els desplaçaments, les deformacions unitàries i la tensió de Von Mises. A la simulació realitzada en el punt 6.2 *Anàlisi estructural del drone*, es donen els valors que prenen aquestes magnituds així com la interpretació feta.

6.4. Impressió 3D

6.4.1. Tipus d'impressores

Aquest apartat pretén fer una breu introducció al món de la impressió 3D. És aquí on parlarem dels diversos tipus d'impressió així com els seus principals usos. En tots els camps d'impressió 3D el procediment és similar. Passa per un disseny previ, mitjançant un programa de CAD, de

la peça a modelar i un cop dissenyada es conclou el procés d'obtenció de la peça en qüestió mitjançant un dels 3 processos més habituals. Seguidament en faig una breu introducció:

La foto polimerització:

La foto polimerització o SGC⁴ treballa mitjançant l'ús d'una resina fotosensible que solidifica sota la llum ultraviolada. Consisteix en dur a terme una solidificació per capes en una única operació a partir de la utilització de màscares creades amb tinta electrostàtica. Anem a veure'n el funcionament de forma més detallada.

Tal i com hem dit la impressió mitjançant foto polimerització treballa realitzant quadres de foto polímer capa a capa. Cada capa completa s'exposa a llum ultraviolada a través d'una màscara col·locada sobre la superfície del polímer líquid. Aquest procés d'enduriment requereix de 2 a 3 segons per capa. Inicialment es genera un model de CAD dividit en cada una de les capes que s'imprimiran fins a confeccionar el total de la peça. Per cada una de les capes es genera una màscara que serà l'encarregada de fer que la radiació ultraviolada només solidifiqui la part que interessa de la peça. A l'hora d'imprimir, per cada una de les capes es col·loca una capa fina de foto polímer líquid i a sobre s'hi situa la màscara. Un cop tot a lloc s'exposa a llum ultraviolada d'alta energia. El líquid que ha rebut la radiació es solidifica, per contra, el que ha quedat a l'ombra de la part tapada per la màscara manté el seu estat líquid. Acte seguit es neteja l'àrea de treball retirant el líquid sobrant i es reomplen les àrees no omplertes amb cera calenta. Aquesta ajudarà a sostenir la peça un cop refredada.

Els materials que s'utilitzen per aquest tipus d'impressió 3D són molt concrets ja que han de ser sensibles a la llum. Els més emprats són els foto polímers en general i les resines fotosensibles. Les aplicacions d'aquesta tecnologia queden reduïdes a presentacions de disseny conceptual, dissenys de prototipatge ràpid, tests d'enginyeria, eines i aplicacions de fosa, etc...

⁴ El nom de la tecnologia SGC prové de l'anglès Solid Ground Curing, curat en terra sòlida. Va néixer l'any 1991 a l'empresa Cubital i es basa en la solidificació d'una resina fotosensible.

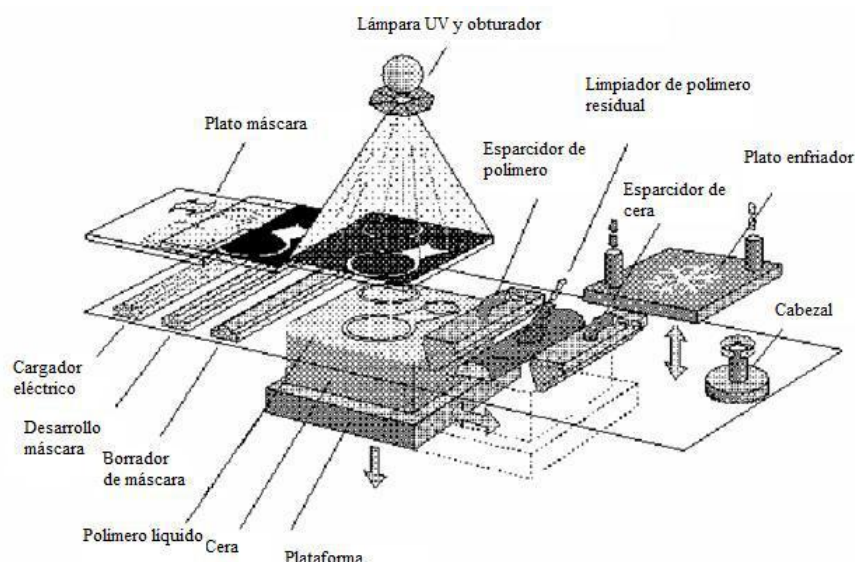


Figura 19: part d'una impressora SGC

La Figura 19 mostra una representació simple de les parts d'una impressora SGC.

Prestacions	Limitacions
Bona precisió i millors propietats mecàniques de les peces degut a la forma de polimerització.	Equips molt cars i pesats. Els més cars poden arribar a costar 400.000€ i pesar fins a 5 tones.
Facilitat de generar més d'una peça a l'hora.	Grans dimensions.
Poques vegades es necessita fer ús de suports gràcies a l'ús de la cera.	El procés és més complex. Això implica la necessitat de personal qualificat.
Les peces presenten gran resistència i alta estabilitat estructural. Menys fragilitat.	La fabricació pot produir encenalls de cera que requeriran neteja a màquina.
No es necessita cap procés de post curat.	El soroll és més alt que en altres processos similars.
Capacitat per generar geometries molt complexes sense gran dificultat.	Els models són translúcids i trencadissos.
Es pot interrompre el procés en qualsevol moment i esborrar capes errònies si n'hi han.	

Taula 3: prestacions i limitacions de la impressió SGC

El procés d'impressió SLS:

El procés d'impressió SLS⁵ es basa en la sinterització de pols poliamida, metalls, ceràmics, elastòmers, materials per la micro fusió, entre d'altres, de forma selectiva per tal de formar la peça. Consta de tres plataformes, una d'alimentació de la pols, la segona per la formació de la peça i una última de recollida de la pols sobrant. El funcionament mostrat en la Figura 20 es basa en el següent. Un sistema de rodets s'encarrega de dipositar la pols sobre la plataforma de formació. Un cop allà el procés de sinterització consisteix en resseguir, de forma automatitzada i utilitzant un làser infraroig, la zona que formarà part de la peça. La pols que hagi estat en contacte amb el làser serà la que posteriorment formarà part de la figura sòlida. La càmera en qüestió està segellada i es manté a una temperatura just per sota el punt de fusió de la pols i dins una atmosfera inerta.

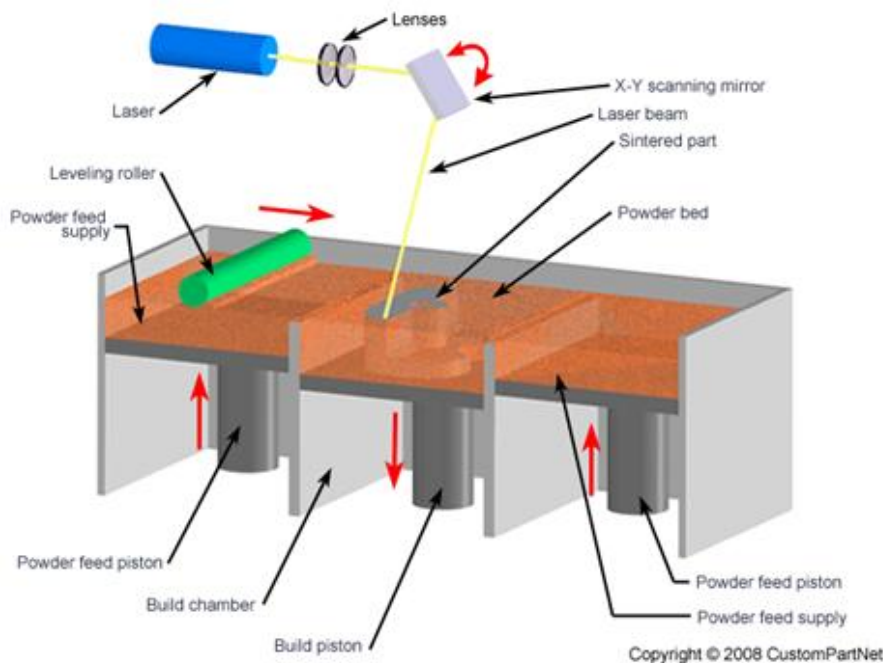


Figura 20: esquema del procés d'impressió SLS

Després de la solidificació de cada una de les capes es retira la pols sobrant tot dipositant-la a la tercera plataforma. D'aquesta pols sobrant se n'aprofita fins a un 30%. Un cop impresa tota la peça s'ha de deixar refredar dins la màquina. La durada d'aquest procés varia en funció de les dimensions de la peça. Les peces més grans poden arribar a estar fins a 2 dies refredant-se.

En aquest procés no es necessiten suports durant la impressió de la peça. La mateixa pols assumeix aquest paper. Tot i que no es necessitin curats posteriors, el procés de sinterització de la peça pot fer que aquesta sigui porosa. Depenent de l'aplicació que li vulguem donar a la

⁵ El nom de la tecnologia SLS prové de l'anglès Selective Laser Sintering, sinterització làser selectiva. És un invent recent i que es troba en vies de desenvolupament.

peça en qüestió pot ser necessari infiltrar la peça amb un altre material per tal de millorar-ne les propietats mecàniques.

La gama de materials que permet imprimir aquesta tecnologia és molt àmplia i depèn bàsicament de la potència del làser. Com més potent sigui més alt podrà ser el punt de fusió del material que es vulgui utilitzar per dur a terme la impressió.

Prestacions	Limitacions
Més bones prestacions que la tecnologia SLA. S'utilitza per la fabricació de peces estructurals i funcionals.	Acabat superficial rugós degut a les micro esferes del material utilitzat.
Un cop impreses, les peces suporten la humitat y temperatures moderadament altes (fins a 180°).	Les propietats mecàniques del material es veuen afectades durant el procés d'impressió.
Possibilitat d'impressió de més d'una peça a l'hora.	Complexitat a l'hora d'intercanviar el material d'impressió a mig procés.
Materials resistents a atacs químics.	Precisió superficial porosa
No requereix un post curat.	Tolerància dimensional variable en funció de les dimensions de la peça.
Autonomia de curat.	Velocitat de producció mitjana.
Fabricació multi sèrie.	

Taula 4: prestacions i limitacions de la impressió SLS

Impressió 3D per extrusió:

Les impressores 3D per extrusió són les que recentment han pres un paper més important en el món de la impressió casolana. El seu funcionament es basa en un extrusor de plàstic capaç de dipositar un filament de plàstic fos que solidifica en el moment d'entrar en contacte amb la plataforma on pren forma la peça. Els moviments a dur a terme per la impressora es generen mitjançant varis programes explicats en l'apartat 5.4.3. *Procés d'impressió* de forma automàtica a partir del disseny CAD de la peça. El format dels arxius d'impressió és el .GCODE. Un *gcode* no és més que un arxiu on hi ha programats tots els moviments que han de fer cada un dels motors de la impressora per tal de confeccionar la peça dissenyada.

La impressora utilitzada en aquest projecte és d'aquest tipus. Així doncs, anem a veure el funcionament de les parts més importants d'aquest tipus d'impressora 3D.

- Motors pas a pas: són els encarregats del moviment tant de la plataforma com de l'extrusor. Se n'utilitzen 3 per tal de desplaçar-se en les tres dimensions i un quart per controlar la quantitat de plàstic que diposita l'extrusor.

El motor que controla el moviment en l'eix X es troba situat sota la plataforma d'impressió. Aquest s'encarrega de fer-la córrer en aquesta única direcció mitjançant un sistema de guies i una corretja. Dos cargols sense fi s'encarreguen de graduar l'alçada de l'extrusor. Aquests fan pujar tota la plataforma d'extrusió tot imprimint cada una de les capes de la peça. Aquest motor regula l'eix Z. La plataforma d'extrusió està formada per un capçal mòbil, com el d'una impressora de tinta, amb moviment en l'eix Y. Un tercer motor pas a pas en regula la posició mitjançant una corretja. Finalment, al capçal hi trobem el quart motor pas a pas. Aquest s'encarrega de introduir el plàstic a extruir dins l'extrusora a l'hora que el retira durant els moviments en què no ha de sortir plàstic.

- Engranatge de tracció: és una politja amb petites dents que s'encarrega de fer entrar dins la extrusora el filament de plàstic per fricció. Aquest gira gràcies al motor pas a pas situat a l'extrusora.
- Rodament de pressió: es troba a l'altre costat de l'engranatge de tracció. És el que pressiona per l'altre costat el filament tot introduint-lo a l'extrusor.
- *Hotend*: és l'element que escalfa el filament fins a la temperatura de fusió del plàstic. Es tracta d'un tub vertical pel qual passa el filament, encara en estat sòlid, i que a la punta assoleix la temperatura de fusió del plàstic. Aquest porta incorporats radiadors per dissipar la calor i evitar que es fongui tot el filament de plàstic que entra a l'extrusora.
- Sensor de temperatura: les impressores acostumen a anar equipades amb dos sensors de temperatura. Un d'ells regula la temperatura de sortida del plàstic per tal d'ajustar-ne la viscositat de sortida. L'altre regula la temperatura de la resistència situada a la plataforma d'impressió. La seva missió és controlar la velocitat de refredament del plàstic a l'entrar-hi en contacte.
- Boquilla de sortida: és una peça metàl·lica en forma de con on arriba el material fos. En funció de la precisió de la impressió que volem dur a terme s'utilitzen boquilles amb diàmetres de sortida més o menys grans.

Hi ha dos grans tipus d'extrusió. La directa i la indirecta. La diferència principal és la situació dels engranatges i del motor d'extrusió. En la directa es troben en el mateix capçal mòbil. Per contra, en la indirecta el plàstic arriba al capçal mòbil guiat dins un tub de tefló. Em centraré

en la directa ja que és la que he utilitzat en el projecte. La Figura 21 en mostra el seu funcionament.

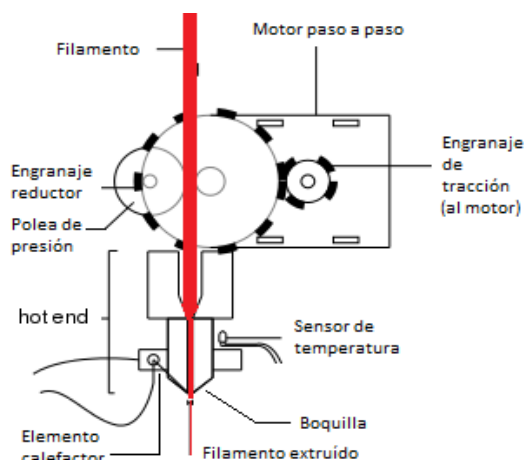


Figura 21: funcionament de l'extrusor

Tal i com he dit, en l'extrusió directe els engranatges i motor d'extrusió es troben en el mateix capçal d'impressió. El plàstic hi arriba en forma de filament i prové d'un rotlle situat en la part superior de la impressora. Durant el procés d'extrusió l'engrenatge de fricció i la politja de pressió empenyen el plàstic cap a l'interior del hotend. Com he comentat anteriorment, és vital que només es fongui el plàstic a la punta de l'extrusor. Si per contra es comença a fondre tot el filament els engranatges que l'empenyen deixen de funcionar correctament i es perd el control de quantitat de plàstic que surt per l'extrusor.

Avantatges	Limitacions
Baix cost.	Acabat superficial de baixa qualitat en funció de la geometria a imprimir.
Petites dimensions.	Necessitat de suports.
Facilitat d'ús.	Temps d'impressió alt.
Apropat per ús casolà.	Necessitat d'un ajustament curós per garantir una bona impressió.
Capacitat d'impressió a dos colors mitjançant una extrusora doble.	Toleràncies més altes que en els altres tipus d'impressió.
Versatilitat. Ideal per el prototipatge ràpid.	
No requereix un post curat.	

Taula 5: prestacions i limitacions de la impressió per extrusió

6.4.2. BCN3D+

Aquest apartat pretén donar la informació detallada de la impressora utilitzada durant el projecte. La impressora en qüestió és la BCN3D+. Té un aspecte com el mostrat en la Figura 22.

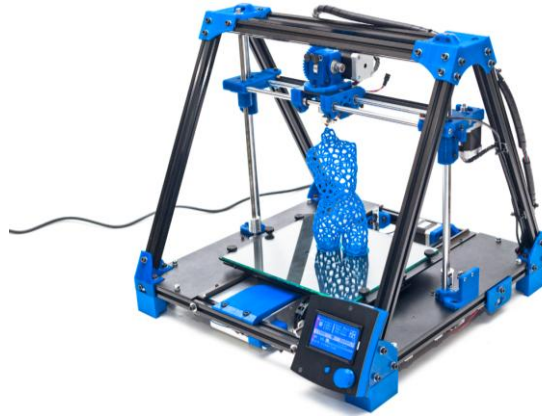


Figura 22: BCN3D+

És una impressora creada a partir d'un projecte anomenat RepRapBCN⁶. Té un cost de 900€⁷, preu que la fa assequible a nivell casolà. Al ser una màquina d'impressió per extrusió té un funcionament com l'explicat en l'apartat anterior. Les seves característiques són les següents:

Volum d'impressió: X=23cm, Y=21cm, Z=19cm

Resolució màxima: 0.10mm

Diàmetre del filament :3mm (fins a 1.75mm amb una modificació de l'extrusor)

Materials compatibles: PLA, ABS, Laywood, Nylon, PVA (de moment)

Hardware: estructura d'alumini anoditzat negre y politges d'alumini.

Extrusor: Full-metal BCNozzle, desenvolupat a Catalunya. Diàmetre de la boquilla 0.4mm

Electrònica: ARDUINO MEGA 2560+ RAMPS. Font d'alimentació i cablejat allotjat a l'interior de la màquina. Impressió a través de tarja SD i control amb pantalla LCD.

Plataforma: base calefactada amb vidre i regulació de temperatura. Calibratge per 3 punts.

Software: programari gratuït i de codi obert disponibles tant per Windows, OSX com Linux.

Altres: no és necessari tenir un ordinador connectat a la impressora durant el procés d'impressió.

⁶ El projecte prengué la iniciativa de desenvolupar tecnologies d'impressió 3D i introduir-les progressivament tot al llarg d'Espanya i Europa. L'objectiu era el de crear una comunitat online, formar estudiants d'enginyeria industrial, mecànica, electrònica i gestió industrial a través de tallers pràctics i de l'aprovisionament de màquinaria opensource.

⁷ El kit de muntatge val 900€. El cost muntada és de 1.300€

6.4.3. Procés d'impressió

He considerat el procés d'impressió com l'iniciat a partir del moment en que extraïem l'arxiu de la peça a imprimir del programa de disseny. En el nostre cas el programa de disseny serà el *Solidworks*. Aquest procés el fem utilitzant un format concret, el .stl. El format .stl és un format d'intercanvi de dissenys 3D. El mateix *Solidworks* permet exportar els arxius amb aquest format. La primera part d'aquest procés d'impressió es duu a terme mitjançant el programa *netfabb*.

El netfabb:

El netfabb és un software especialitzat per a la impressió 3D. Quan l'instal·les el configures ja d'acord amb la impressora que utilitzaràs. Concretament permet fer tasques de posicionament i gir de la peça respecte la plataforma d'impressió. Una altre de les opcions que he utilitzat del programa és la de reparació d'arxius. En funció de la geometria, a vegades quan l'exportes del Solidworks hi ha algun triangle que no queda del tot definit. El programa té una opció que és la reparació automàtica de peces. Finalment pots dur a terme un escalat de la peça si les dimensions són superiors a les de la base d'impressió. Un cop reparada i posicionada la peça es torna a extreure del netfabb mitjançant el format .stl.

Slic3r:

L'Slic3r és el generador de *gcodes*. És aquest programa el que escriu tot el codi de moviments que durà a terme la impressora per tal d'imprimir la peça dissenyada. Es comença important el model exportat del netfabb. Un cop importat el programa permet visualitzar l'objecte sobre la plataforma d'impressió. És una bona forma de comprovar si tot el procés anterior s'ha fet correctament. A part, permet fer talls de la peça en cas de no voler-la imprimir sencera.

Un cop ens hem assegurat de que tot és correcte es carrega la configuració d'impressió. Les més útils en el meu projecte són les següents:

Configuració	Descripció
ABS_ST_0214	Impressió amb plàstic ABS amb qualitat d'impressió estàndard.
PLA_HQ_0214	Impressió amb plàstic PLA amb una alta qualitat d'impressió.
PLA_HS_0214	Impressió amb plàstic PLA a alta velocitat.
PLA_ST_0214	Impressió amb plàstic PLA amb qualitat d'impressió estàndard.

Taula 6: taula de qualitats de configuracions d'impressió

Un cop introduïda la configuració d'impressió es donen varis paràmetres d'impressió. Seguidament els mostro i explico de forma breu.

- **Fill Density:** és aquí on es defineix el tant per cent de densitat de la peça. S'expressa en format decimal, és a dir, 0,1 per un 10%, 0,9 per un 90%. Es pot configurar la densitat a 0% si interessa fer peces buides per dins. Per contra, si li donem un valor de 100% la peça quedarà completament massissa. Lògicament, com més alta és la densitat més alts són tant el temps d'impressió com la quantitat de material utilitzat.
- **Fill pattern:** aquesta opció ens permet definir el patró a utilitzar a l'hora d'omplir. N'hi ha de rectilinis, en hexàgons, concèntrics, etc...
- **Top/Bottom fill pattern:** Aquí es defineix el patró que volem utilitzar en les capes superiors i inferiors.
- **Infill Every:** amb aquest paràmetre podem configurar cada quantes capes volem que en faci una amb el patró determinat en el fill pattern. El valor que entrem és el nombre de capes entre capes impreses amb el patró.
- **Solid Infill every:** és aquest el lloc on es defineix cada quantes capes volem que en creï una de solida. Aquest paràmetre ajuda a donar una rigidesa extra a la peça.
- **Solid Infill Threshold area:** defineix la superfície mínima en mm^2 de les àrees a omplir de forma solida per tal d'assegurar un mínim de bona resistència mecànica. Per defecte està configurat a 70.

L'Slic3r disposa d'una secció especialitzada a l'hora de crear suports per les peces impreses:

- **Generate support material:** aquesta opció permet que el programa decideixi de forma automàtica si en algun punt de la peça ha de crear suports externs per tal de garantir-ne una bona impressió.
- **Overhang threshold:** un dels problemes que presenten les impressores 3D és quan s'ha d'imprimir sobre una superfície que no té base. En aquest casos el mateix programa permet solucionar-ho. Ell mateix es crea suports en els trams que queden penjats. Aquest paràmetre permet dir al programa a partir de quin angle volem que situï els suports. Generalment es creen suports a partir dels 45° . Si posem el valor 0 el mateix programa ho farà de forma automàtica.
- **Enforce support for the first:** si ho volem, podem forçar que la impressora es generi material de suport cada un determinat nombre de capes. És útil per a peces altes i inestables.
- **Raft layers:** el *raft* és una base de material que es pot afegir sota la peça per tal de millorar-ne l'adherència amb la base d'impressió.

- Pattern: podem triar el tipus d'estructura a imprimir en els suports. En cas de grans estructures de suport és millor utilitzar-ne una d'hexagonal.
- Pattern spacing: defineix l'espaiat entre les capes de suport.
- Interface layers: des d'aquí podem definir com volem que ens uneixi el suport amb la peça. Amb aquest paràmetre definim quantes capes hi volem. Com més capes hi afegim més difícil serà treure el suport i més marcada ens quedarà la peça. Per contra, si n'hi posem poques hi ha la possibilitat que es trenqui el suport.

Un cop decidit amb quin material imprimirem, configurada la impressora per imprimir amb el material desitjat i adaptats tots els paràmetres anteriors per a la geometria desitjada podem extreure'n el gcode.

Un cop exportat el gcode he utilitzat una pàgina web que en permet la visualització. La pàgina s'anomena *gcode analyzer*. Carregant l'arxiu d'impressió et dona informació interessant sobre varis paràmetres. En primer lloc et fa una estimació de la quantitat de material necessari per imprimir la peça i del temps d'impressió. Una altre opció interessant es la de veure el procés d'impressió per capes. Serveix per assegurar que imprimirà tota la peça. A la Figura 23 podem veure una captura de pantalla del visualitzador de *gcodes*. En aquest cas és l'arxiu d'impressió d'una dels difusors.

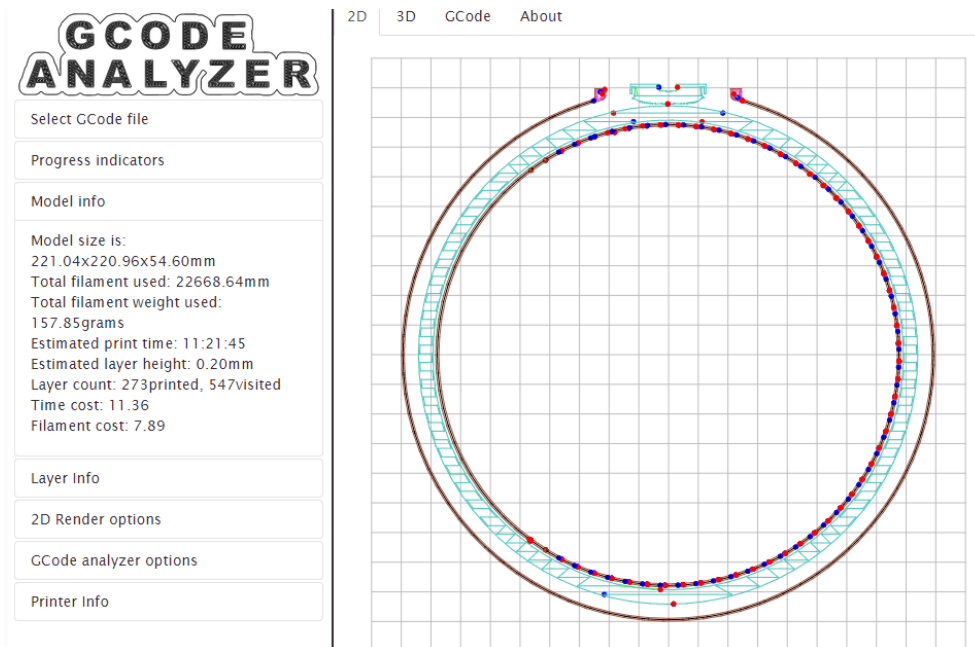


Figura 23: visualitzador del gcode d'una de les peces impreses

Un cop finalitzat el procés de creació del gcode comença la impressió. La impressora llegeix targetes SD, així doncs només falta copiar el gcode a la tarja, esperar a que l'impressora assoleixi la temperatura necessària mitjançant el procés de *preheat* i imprimir des de la tarja SD.

7. Càlculs i procediments

Aquest és el capítol més extens del projecte. És una memòria de tots els dissenys, càlculs, proves i comprovacions que he dut a terme en l'elaboració del treball. Es mostren ordenades cronològicament. És aquí on es mostra l'evolució seguida i els canvis de gir que ha anat prenent el projecte en funció de les dificultats trobades. Tal i com he explicat en el resum del treball, inicialment l'objectiu era dissenyar i imprimir en 3D un drone que utilitzés un sistema de propulsió innovador. Quatre turbines acoblades a quatre difusors. La idea o origen del projecte venia d'un nou tipus de ventiladors de la casa Dyson anomenats Dyson Multiplier. El Dyson Multiplier és un ventilador poc convencional que funciona sense aspes. Tal i com es pot veure a la Figura 24, està format per un cercle buit per dins connectat a una turbina. Concretament aquesta imatge va ser que la em va fer plantejar la idea d'intentar crear un drone que funcionés amb el mateix principi.

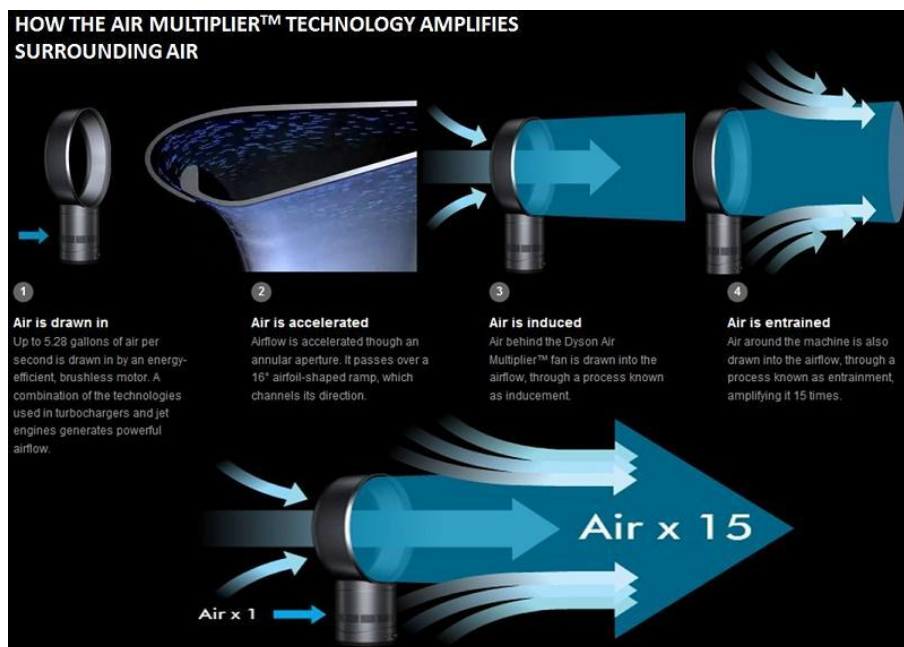


Figura 24: funcionament del Dyson Multiplier

Per una millor gestió de tots els dissenys i proves fetes vaig crear un document de registre de tots els dissenys fets. Aquest registre m'ha servit també per apuntar-me sobre la marxa les millores, errors, problemes que em donaven cada un dels dissenys. El registre en qüestió així com les imatges de les peces impreses es pot trobar dins l'Annex 2.

L'Annex 1 (en format digital) conté tots els dissenys, arxius STL i gcodes generats per la impressió.

7.1. Elaboració d'un disseny imprimible en 3D

El primer pas va ser provar de crear un difusor amb unes característiques i propietats similars a les del ventilador que havia inspirat la idea del projecte. La primera incògnita era si podria fer un disseny amb una geometria similar, el podria imprimir de forma fàcil en 3D i si el difusor, un cop imprès, seria capaç d'enviar aire a través de tot el cercle tant sols projectant-lo a partir de la sortida. Per fer-ho vaig començar buscant una imatge on es veiés una secció del contorn de l'ala del difusor. Després d'imprimir-la a escala em vaig dedicar a acotar-ne el contorn per tal de poder-ne dibuixar una rèplica amb el *Solidworks*. El resultat i l'evolució els mostro en les Figures 25 i 26.

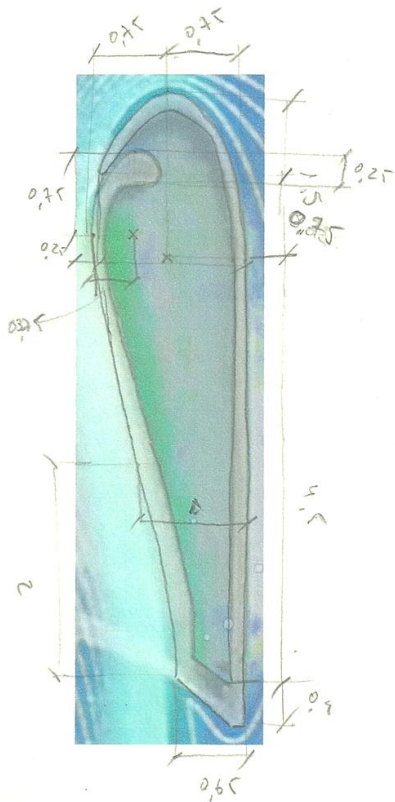


Figura 25: secció d'un ventilador Dyson



Figura 26: secció dissenyada amb *Solidworks*

L'objectiu d'aquest disseny no era fer-ne un de definitiu que proporcionés les millors condicions aerodinàmiques, sinó tenir-ne un per tal de començar a fer proves d'impressió.

La primera impressió, per tal de limitar el temps que trigava a imprimir la vaig fer a escala 1/2 i partida per la meitat. La posició de la peça a l'hora d'imprimir va ser col·locar el tall com a base. El problema d'aquesta impressió va ser el posicionament. Durant el procés, hi havia un bon tros de la peça que quedava penjant en forma d'arc. La impressió es va dur a terme sense la creació de suports fet que va fer que es despregués part del plàstic tot donant un mal acabat superficial. Un altre dels inconvenients que mostrava el fet d'imprimir en aquesta posició era com quedaven distribuïdes les capes de plàstic. Com es pot veure en la Figura 27,

les primeres capes de plàstic quedaven paral·leles al tall. A mesura que a que avançava la impressió les capes deixaven de ser paral·leles al tall que es duria a terme en el punt on s'està imprimint si el féssim de forma longitudinal. Aquestes diferències en el patró d'impressió eren un problema ja que el patró d'impressió no era igual en tots els punts del difusor.

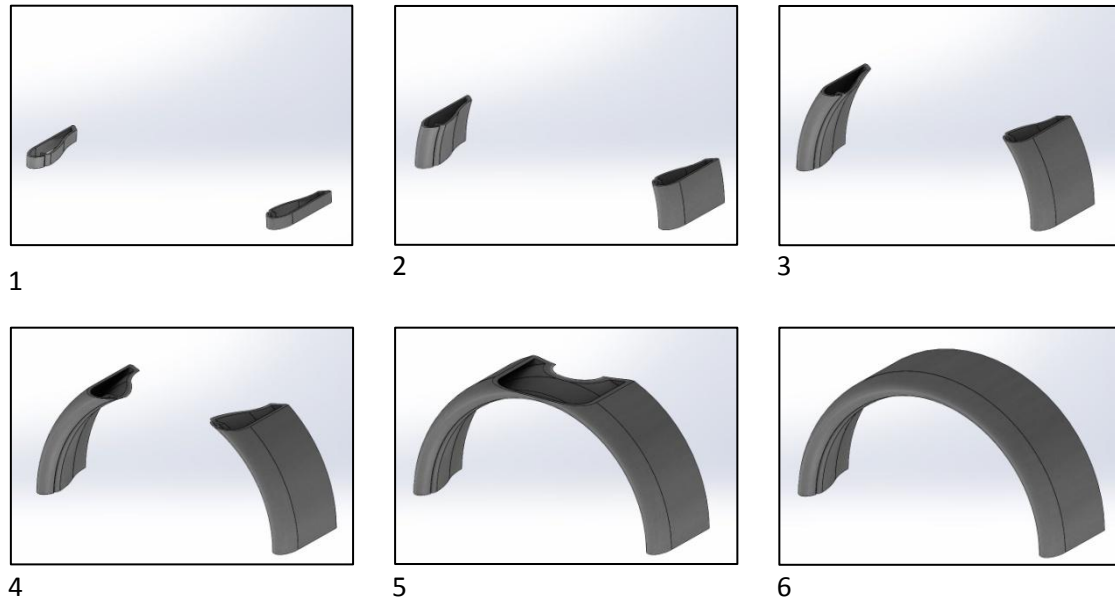


Figura 27: successió d'imatges que mostren el procés d'impressió de la primera prova

Vista la poca funcionalitat de la primera impressió la següent millora va passar per canviar la posició del disseny. Una altre possible opció era provar d'imprimir la peça en la seva posició natural, la mostrada en la Figura 28. Inicialment presentava un avantatge clar. Així com l'anterior disseny requeria la impressió de dues meitats per separat i la posterior unió, fet que en feia perillar l'estabilitat estructural, d'aquesta forma es podia imprimir la peça sencera. El què no estava resolt en aquest cas era el tema dels suports. Tota la part interior del difusor quedava penjant. El dubte era si la impressora necessitaria crear suports per tal d'imprimir la part superior. Així doncs vaig fer un altre disseny de tant sols una vuitena part de la peça. En una zona li vaig col·locar petits suports dissenyats amb el *Solidworks* mateix, i la resta vaig deixar que fos la mateixa impressora que els generés de forma automàtica.

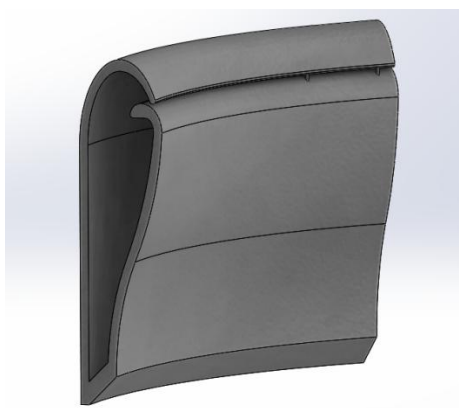


Figura 28: nou posicionament de la peça

El resultat no va ser especialment bo. La impressora havia generat un suport a tota la part interior de la peça. Això era un problema ja que significava que si la volia imprimir sencera hauria de treure d'alguna forma tots els suports que generava a l'interior del difusor. Si no seria impossible que l'aire circulés pel seu interior. Per altra banda, fet així quedava solucionat el patró d'impressió. D'aquesta forma era totalment regular a qualsevol secció vertical de la peça.

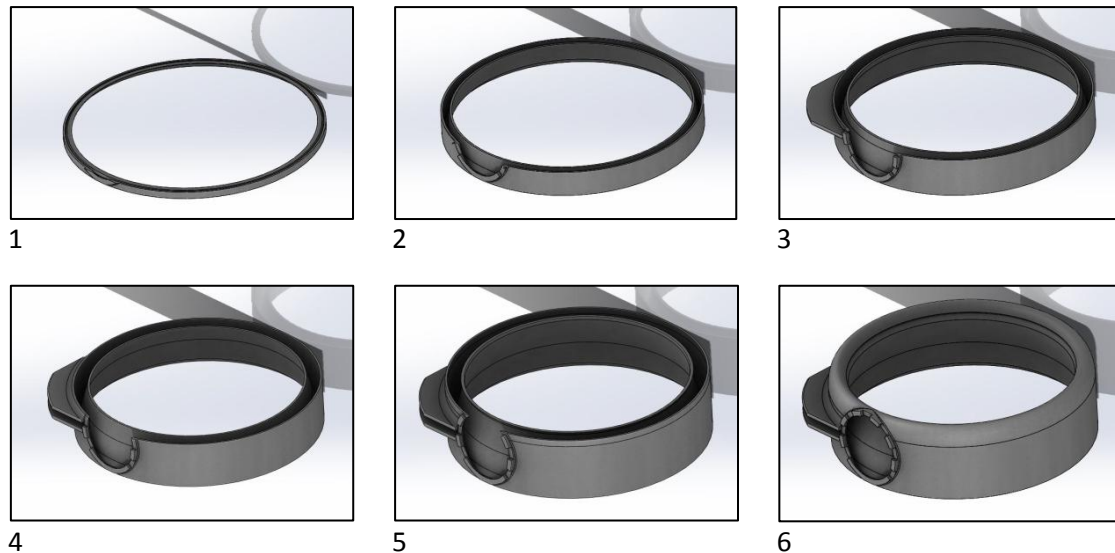
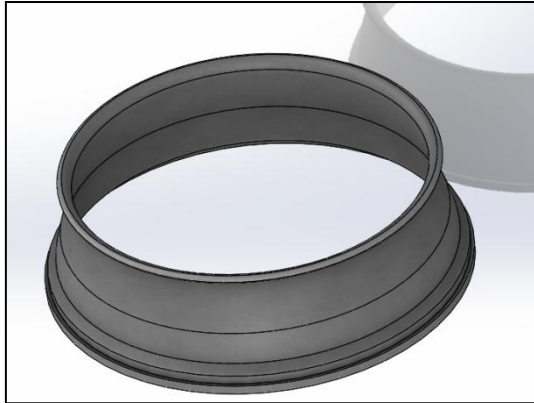


Figura 29: procés d'impressió del difusor sencer

Tot i així vaig voler provar una impressió sencera. El procés d'impressió va ser el mostrat a la Figura 29. Per sorpresa meua, el suport interior el va crear en forma d'una gran malla que vaig poder treure de l'interior de la peça sense excessius problemes. El mateix programa va crear suports per al ressalt de l'esquerre de la peça i tot i que l'acabat superficial no va ser perfecte no va portar tants problemes com creia. Del què em vaig adonar amb aquesta impressió va ser que seria molt difícil aconseguir un acabat totalment llis. Això era un problema ja que la rugositat de la peça afectaria de forma important el funcionament del difusor. Aquest fet em va fer veure clar la necessitat de com a mínim polir la peça per tal de disminuir-ne la rugositat. El gran problema era com aconseguir polir tota la part interior del difusor. Va ser aleshores quan vaig començar a buscar la forma de dur a terme la impressió en dues parts. En comptes de partir-la verticalment i imprimir-ne dues com havia provat fins ara vaig creure en dividir-la en zona interior i exterior. Fet així podia accedir de forma senzilla a la part interior i minimitzar-ne els suports gràcies a un millor posicionament de cada una de les parts. A l'hora de dissenyar la peça amb el *Solidworks* vaig fer-hi una petita modificació. Un encaix per tal de poder enxanar les dues peces un cop impreses. Els dissenys van ser els de la Figura 30.

1_1_04: Exterior del cercle per fer proves. Entrada d'aire d'un diàmetre interior de 38 mm.

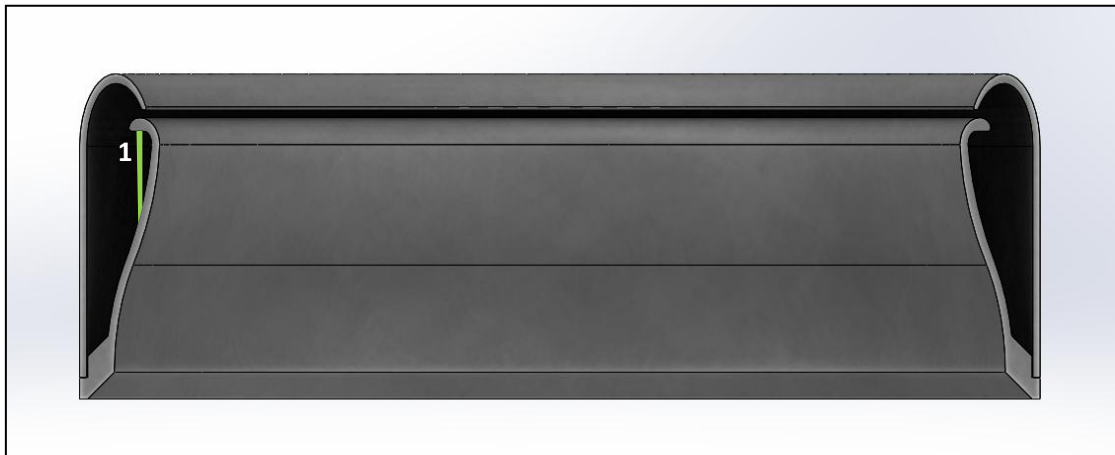
1_1_05: Interior del cercle per fer proves.



1_1_05



1_1_04



4_1_02

Figura 30: disseny del difusor a partir de dues peces

Els resultats d'aquesta impressió van ser molt bons. L'interior del difusor el vaig imprimir tal i com es veu en la imatge, de cap per amunt. L'únic punt que va necessitar suports és el marcat amb un número 1. Allà hi va crear tota una estructura fàcil de retirar per evitar que en pengés la part superior. Per altra banda, l'exterior el vaig imprimir al revés de com està posicionat en la Figura 30, 1_1_04. Fet així evitava tots els suports que havia creat la mateixa impressora en les altres proves. L'únic punt que va requerir la creació de suports va ser l'interior del forat del cercle exterior. Tot i així eren molt fàcils d'extreure per tant no van suposar cap dificultat extra.

El principal avantatge que suposava la impressió de la peça d'aquesta forma era poder veure i actuar sobre la part interior del difusor. Tal i com he explicat en els fonaments del projecte, aquesta part interior és la que presenta les majors pèrdues de càrrega del difusor. Així doncs, és vital que la rugositat sigui mínima aconseguint un acabat superficial que minimitzi les pèrdues. Fet així permetia polir el difusor per tots cantons i fins i tot si feia falta poder-li donar una capa de vernís o pintura.

Aquest va ser el model que em va permetre poder fer les primeres proves. Les primeres proves van consistir en introduir a l'entrada del difusor muntat un embut. L'embut em permetia

poder acoblar diferents sistemes d'injecció d'aire per tal de provar com el difusor feia variar la quantitat d'aire a la seva sortida.

Des de casa, el mètode més senzill per mirar com variava la sortida d'aire era pesant la força que produïa l'aire al sortir. Per fer-ho col·locava, en els primers casos un assecador de cabell, encarat a una balança i pesava la força que feia l'aire un cop engegat. Per acció reacció el pes mesurat per la balança era igual al pes que podia aixecar aquell assecador. En el cas del drone, el pes que generava l'aire d'un sol difusor bufant cap avall era igual a una quarta part del pes que podia aixecar el conjunt del drone. Cal tenir en compte que el disseny del drone està format per quatre difusors.

El resultat de la primera prova va ser molt dolent. L'assecador de cabells sol produïa una força de 36 g. sobre la balança, per contra, si hi acoblava el difusor i l'encarava altre cop cap a la balança la força es veia reduïda pràcticament a la meitat. Marcava 19 g. Aquests primers mals resultats els vaig associar a que l'assecador, evidentment no està preparat per enviar aire a cap difusor i per tant la pressió que donava era baixa, no enviava prou quantitat d'aire al difusor. La prova és que vaig observar que per els punts més allunyats de l'entrada d'aire pràcticament no en sortia.

Aquests primers mals resultats em van fer replantejar algunes parts del disseny i començar a buscar algun tipus de turbina adequada per el què volia dur a terme. Vaig estar buscant tipus de turbines que m'encaixessin, tant per funcionament com per pes i mides, al què volia fer. Segons semblava el què més s'adaptava era alguna turbina d'aeromodelisme. Vaig buscar la que per mides em donava el màxim thrust⁸ i pesava menys. Les especificacions eren les següents:

Dr. Mad Thrust 50mm 10 Blade Alloy EDF 3300kv

P/N: LEDFDPS10B50-1A33



Figura 31: Dr. Mad Thrust 50mm 10 Blade Alloy EDF 3300kv

⁸ És la força de propulsió que és capaç de donar una turbina, hèlice, reactor, etc... En el nostre cas va mesurada en grams.

Les especificacions són les mostrades en la següent taula:

Rotor size:	50mm/10blades
Sell No.:	4S
Weight (Total):	97g
MAX RPM:	50000
MAX Power (10sec.) Watt:	430W
Continuous Power Watt:	390W
Motor size:	B2040
Kv:	3300
Voltage:	14.8V
Current:	28A
Thrust Power Upto:	650g
Inner Dia:	50mm
Outer Dia:	52mm
ESC(timing):	Higher

Taula 7: taula d'especificacions de la turbina

Mentre esperava a que arribés la turbina vaig seguir fent proves i dissenys. Per resoldre les rugositats que deixava la impressió vaig provar dos processos diferents:

Envernissat posterior a la impressió:

Un cop impreses les dues peces els vaig aplicar a mà un vernís de poliuretà mono component. El vernís era d'aspecte lluent i va deixar a les peces un acabat com el mostrat en les Figures 32 i 33.



Figura 32: interior del difusor envernissat



Figura 33: exterior del difusor envernissat

Durant l'aplicació semblava que el vernís tapava les imperfeccions de la peça tot deixant un millor acabat superficial que l'inicial. Tot i així, un cop seques van reaparèixer les imperfeccions tot deixant un tacte gomós a les peces. Una altra de les comprovacions que vaig fer un cop envernissades va ser la de mirar el pes extra que en suposava el vernís. En total sumava 2g. per peça impresa tot sumant 4g. per difusor i 16g. per conjunt del drone.

Impressió amb ABS i tractament posterior amb acetona:

Fins ara les peces havien estat impreses amb el plàstic PLA. Aquest tipus de plàstic és el que s'utilitza quan t'inicies en el món de la impressió 3D. Porta menys complicacions que l'ABS fet que els resultats inicialment siguin millors. L'ABS té certs avantatges en comparació amb el PLA. En primer lloc té un més bon acabat superficial i dona un millor aspecte. A més presenta un peculiaritat interessant, és soluble en acetona.

Un dels post processos més típics en la impressió 3D amb ABS són els banys de vapor d'acetona. Tal i com comentava, l'acetona té la capacitat de dissoldre parcialment l'ABS tot allisant-ne es parets i donant a les peces un aspecte lluent. Des de casa vaig voler fer la prova. En primer lloc vaig agafar una cassola vella i la vaig omplir amb un dit d'acetona. Vaig posar l'olla al foc a l'aire lliure per tal de fer evaporar l'acetona. Abans d'introduir la peça sencera vaig estar fent proves amb trossos d'ABS. En el moment que entraven en contacte amb el vapor començaven a adoptar un aspecte lluent. Mica a mica es veia com s'anaven dissolent les parets tot deixant un millor acabat superficial. Si seguies el procés les peces s'arribaven a fondre tot gotejant en forma d'ABS líquid i acetona condensada. Un cop refredades, les peces recuperaven la rigidesa però veien lleugerament modificades les seves formes. Un cop provat amb trossos de plàstic de menys importància em vaig decidir a fer-ho amb una de les peces originals. Un cop tornava a veure com s'evaporava l'acetona vaig col·locar a l'interior de l'olla l'exterior del difusor. La vaig introduir sense que toqués directament l'acetona líquida. Per fer-ho vaig fer un petit suport de fil ferro. Vaig esperar fins a veure com s'havien dissolt parcialment les parets. A les figures 34 i 35 es mostra la peça just al situar-la dins l'olla i al treure-la després del procés.



Figura 34: fotografia feta just al introduir la peça



Figura 35: fotografia feta al cap de 3 minuts

Quan vaig treure la peça tenia un aspecte totalment gomós i era relativament flexible. Vaig deixar-la refredar tot esperant que tornés a recuperar la rigidesa inicial. Durant aquest procés la peça es va deformar de forma considerable. Aquest fet va ser la prova que, en el meu cas, els banys en vapor d'acetona tampoc eren una bona solució a l'acabat superficial. Aquest procés funciona si la peça no mostra parets molt primes. La peça en qüestió ha de ser molt sòlida per tal que l'interior quedi intacte i només variïn les propietats de l'exterior.

7.2. Anàlisi estructural del drone

Per tal de dur a terme la simulació del drone sencer vaig haver-ne de dibuixar un d'una sola peça. Tal i com he explicat en els fonaments del projecte, el programa de simulació que vaig utilitzar era el *Solidworks Simulation*. Aquest programa està preparat per simular peces, per tant no podia aprofitar l'assemblatge del drone que ja tenia. El drone construït a partir d'una sola peça és el mostrat en la Figura 36. La peça està formada per quatre blocs propulsors girats 90°. A la part central hi ha una plataforma on hi anirien situades les bateries, estabilitzadors i giroscopis, el receptor, etc...



Figura 36: disseny creat per a les simulacions

L'objectiu de la simulació era veure si estructuralment el drone aguantava les forces màximes, que per les turbines que duia, podien aparèixer. El disseny era similar al que probablement seria el definitiu.

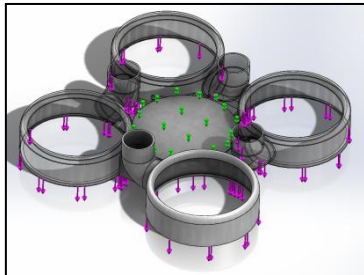
Procediment:

Un cop entrada la geometria com a una sola peça, el primer pas és configurar el material. El mateix programa compta amb una base de dades de materials fet que simplifica la introducció de les dades. En el nostre cas seleccionem l'ABS.

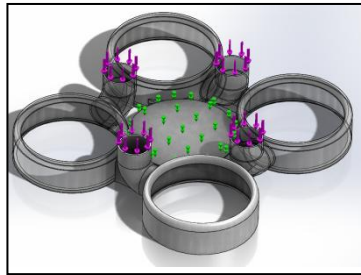
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2410000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3897	N/D
Módulo cortante	862200000	N/m ²
Densidad de masa	1070	kg/m ³
Límite de tracción	40000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico		N/m ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2618	W/(m·K)
Calor específico	1900	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura 37: dades del material emprat per a la simulació

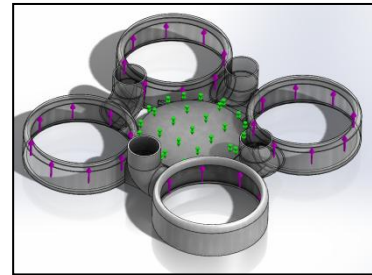
Un cop seleccionat el material el següent pas és definir les càrregues a suportar. Per simplificar els càlculs vaig estudiar el drone com si la plataforma central fos fixa i les càrregues fossin el pes dels difusors, el de les turbines i la força de sustentació. En la Figura 38 les fletxes verdes signifiquen que la placa és fixa. Les liles indiquen les càrregues aplicades.



El pes de cada un dels difusors és de 170g. Apliquem una càrrega de **-1,7N** a cada un dels difusors.



El pes de cada una de les turbines és de 100g. Apliquem una càrrega de **-1N** a cada un dels difusors.



La força de sustentació no la coneixem. Com més gran la prenem més desfavorable serà la simulació. La considerem de 1Kg. Apliquem una càrrega de **10N** a cada un dels difusors.

Figura 38: càrregues aplicades durant l'estudi

Un cop aplicades les càrregues procedim al mallat. El *Solidworks Simulation* per defecte crea una malla. És la utilitzada en la simulació. Un cop mallat llencem el càlcul. Els resultats són els següents:

Coherència dels resultats:

Un cop aplicades les càrregues i passat el temps en que el programa soluciona el cas el programa ens mostra la deformació que pateix la peça de forma exagerada. Aquest pas té la funció de veure si la peça es deforma tal i com esperàvem. Una altra informació que ens dóna és el desplaçament màxim del model.

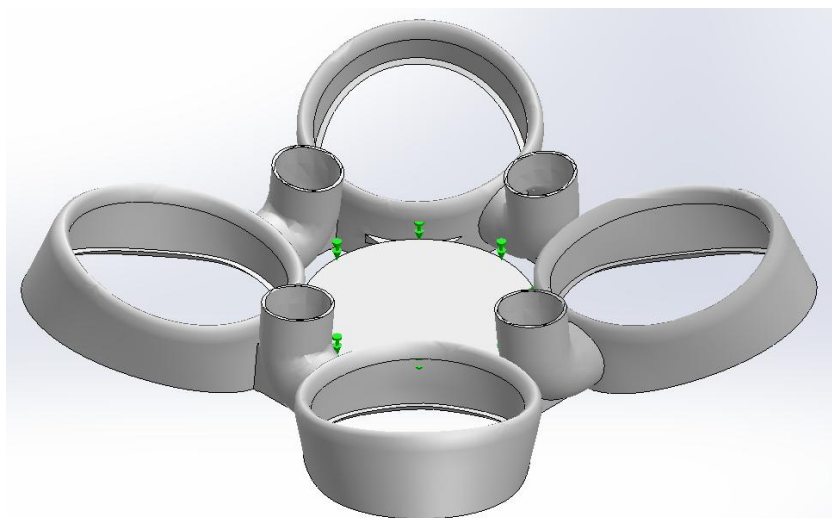


Figura 39: imatge generada pel programa per tal de comprova si els resultats són coherents

Com es pot veure en la Figura 39, els cercles propulsors del drone tendeixen aixecar-se. És coherent. Partim de la base que la plataforma l'hem simulat com si fos fixa. Així doncs les càrregues que han intervingut en la simulació són el pes de les turbines, el pes de cada un dels difusors i la força de sustentació ordenades de menys a més. El pes de la turbina, al ser bastant proper a la plataforma, pràcticament no ens ha fet deformar el sòlid. On es veu la deformació més gran és en els cercles difusors. Allà hi ha aplicat el pes del difusor contrarestant una part de la sustentació generada en aquest punt. A la pràctica és com si en cada un dels difusors hi apliquéssim una càrrega de 8,3N. Aquesta és la que ens provoca la deformació clara de la imatge. Pel què fa al valor del desplaçament màxim, el programa valora la deformació màxima del model en 0,000456605 m, és a dir, 0,46mm. Aquest valor és coherent i raonable pel què fa a les dimensions del drone.

Anàlisi dels resultats:

Tal i com he comentat en l'apartat 5.3.2 *Solidworks Simulation*, les 3 representacions bàsiques per tal de determinar els esforços d'una peça són la tensió de Von Mises, la deformació unitària i els desplaçaments. Així doncs, comencem a analitzar els resultats obtinguts sobre la tensió de Von Mises.

Tensió de Von Mises obtinguda:

Com a definició, la tensió de Von Mises és una magnitud física proporcional a l'energia de distorsió. És una tensió resultant que parteix de les tres tensions principals. Matemàticament presenta la següent forma:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Ec. 16 expressió de la tensió de Von Mises

El valor de la tensió de Von Mises ens indica quan la peça en qüestió entre en règim plàstic o trenca. Això depèn de amb quin valor ho comparem.

- La peça es deforma plàsticament (de forma permanent) si el valor de la tensió de Von Mises supera el límit elàstic del material.
- La peça trenca si el valor de la tensió de Von Mises supera la resistència del material.

Des d'un punt de vista d'anàlisi estructural, per tal de garantir el bon funcionament de la peça, ens interessa evitar l'entrada del material al règim plàstic. Per tant, les tensions màximes aparegudes a la simulació no l'haurien de superar.

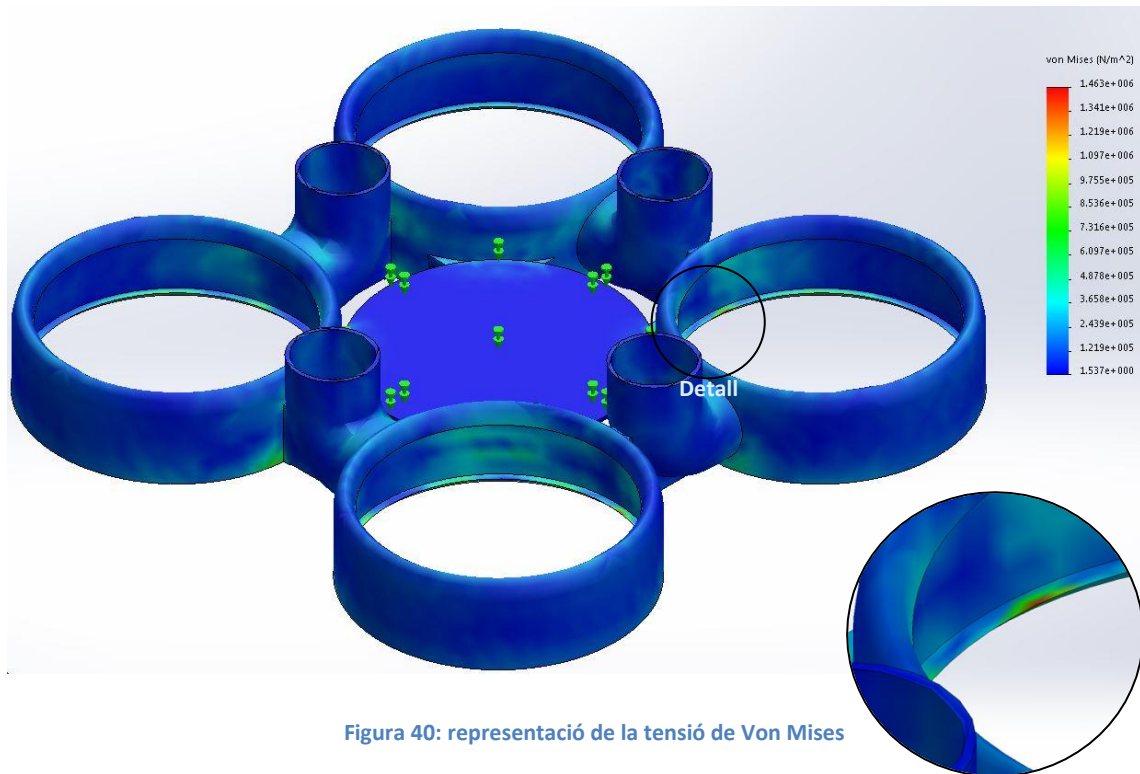


Figura 40: representació de la tensió de Von Mises

Com es pot veure en la Figura 40, la major part de la peça té un valor de la tensió de Von Mises molt baix. Aquest oscil·la entre $1,219 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ i $2,439 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$. Això demostra inicialment que la peça no pateix problemes de disseny.

Si ens anem a fixar en punts concrets que poden estar sotmesos a càrregues més elevades ens trobem els punt d'unió entre el colze i el difusor. Com havíem vist anteriorment en l'anàlisi dels desplaçaments, la peça flexava a partir del punt d'unió entre els difusors. En aquest anàlisi és on es veuen reflectides les tensions que apareixen en aquests punts. En la vista de detall anterior es mostra una zona marcada en colors vermellors on les tensions prenen valors més elevats. Aquests creixen de forma considerable des dels $2,439 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, predominants en tota la peça, fins al màxim de $1,463 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$ just en el centre. Així doncs podem concloure que aquest és el punt més delicat del conjunt.

Si ens fixem en el límit elàstic de l'ABS, material emprat a l'hora de simular el conjunt, veiem que té un valor 40 N/mm^2 . Això ens afirma que la peça queda molt lluny d'entrar en règim plàstic. Conseqüentment, si no entra en règim plàstic, queda més lluny encara de la fractura. D'aquesta forma concloem la viabilitat estructural de la peça.

Desplaçaments obtinguts:

La Figura 41 ens mostra, sense veure la deformació de la peça, el valor que prenen els desplaçaments en cada un dels punts de la superfície en funció del color de l'escala.

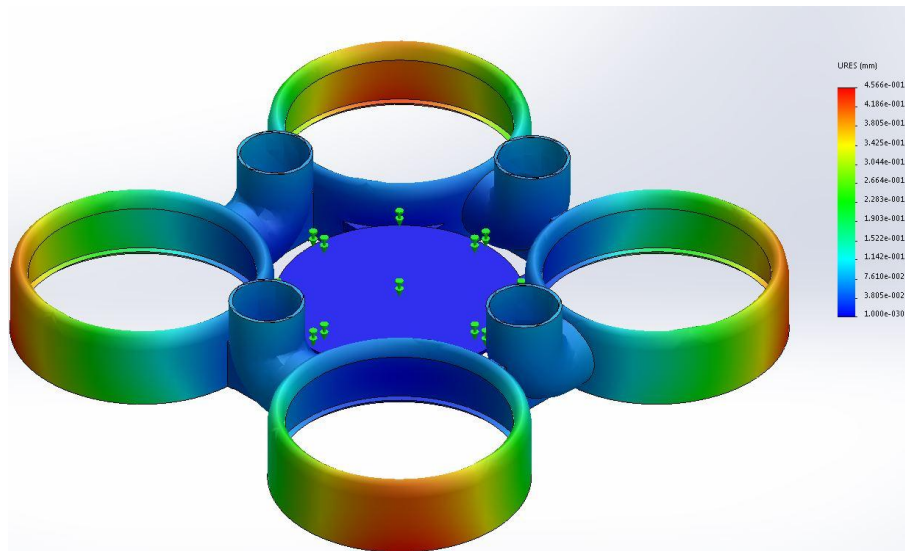


Figura 41: anàlisi dels desplaçaments obtinguts

Com es pot veure els punts que pateixen un desplaçament més gran són els més allunyats de la plataforma fixa del drone. Això és degut a la distància que els separa i a que és el punt on fan efecte les forces més grans que apareixen al drone, les de sustentació. Aquests punts veuen un desplaçament màxim de 0,4566 mm. Tenint en compte que cada un dels difusors té un diàmetre de 19 cm, el percentatge de desplaçament que veu aquest punt és del 0,24%. Un bon resultat pel què fa a desplaçaments.

Si ens fixem ara amb la resta del drone els valors de desplaçaments són mínims. Els podem considerar negligibles. Els colzes d'entrada d'aire als difusors, lloc on s'hi veu aplicat el pes de les turbines assoleixen un valor màxim de desplaçament de $7,61 \times 10^{-2} \text{m}$. Aquest valor tant baix és degut a la proximitat amb el punt fixa del drone i a la baixa càrrega que presenten les turbines degut al seu baix pes.

Deformació obtinguda:

La Figura 42 ens mostra quins són els punts que han patit una deformació més gran. Es defineix com a:

$$\text{Deformació} = \frac{\text{increment de longitud}}{\text{longitud inicial}}$$

Ec. 17 expressió de la deformació

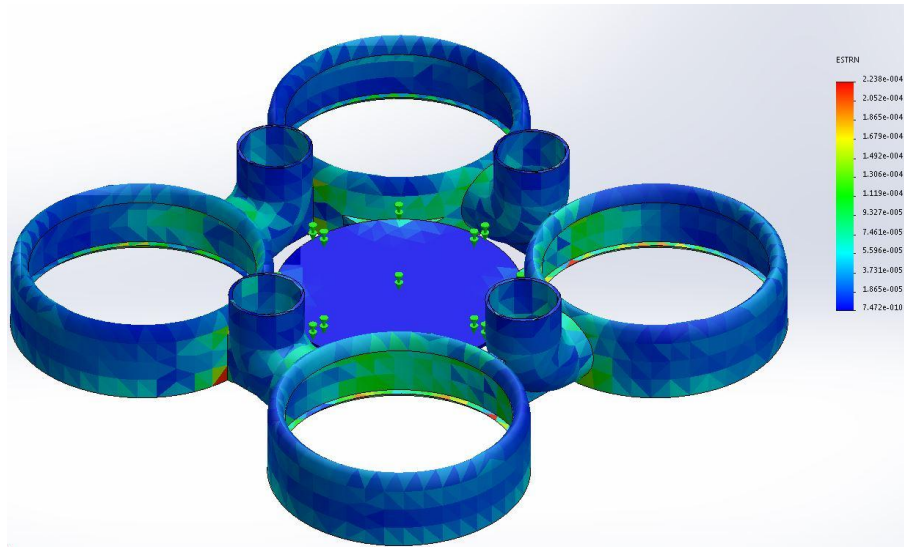


Figura 42: anàlisi de la deformació obtinguda

Com es pot veure en la Figura 42 els punts que pateixen més deformació són els mateixos on anteriorment hi havíem trobat un tensió de Von Mises més elevada. El motiu pel qual coincideixen és perquè al registrar-se unes tensions més altes aquell lloc pateix una deformació major. Tot i així els valors de deformació queden molt lluny de suposar un problema de disseny.

Un cop realitzada la simulació i analitzats els resultats puc concloure que el disseny realitzat presentarà una estructura rígida i sense problemes per aguantar les tensions de funcionament.

7.3. Creació d'un disseny per fer proves amb la turbina

A finals de març em va arribar la turbina detallada en el punt 6.1 *Elaboració d'un disseny imprimible en 3D*. A partir de la turbina vaig crear de nou un disseny de difusor similar a l'emprat per fer les proves que s'adaptés completament a la turbina. Aquest nou disseny es va basar en 4 peces. L'interior i exterior del difusor, la part del colze en contacte amb el difusor i la part del colze en contacte amb la turbina. En aquest punt explicaré la creació de cada un dels dissenys.

Interior del difusor:

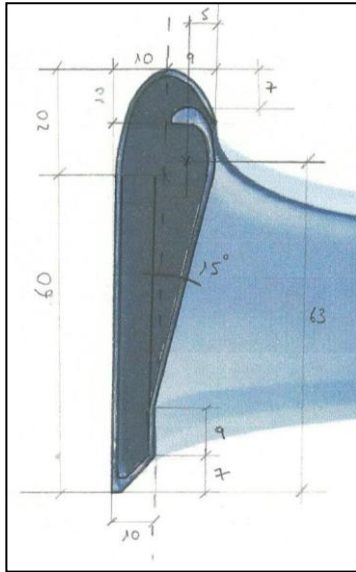


Figura 43: secció d'un ventilador Dyson

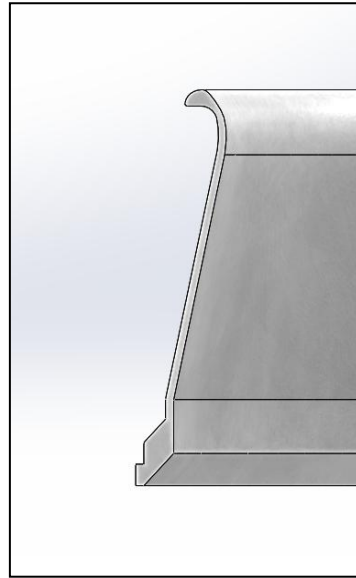


Figura 44: secció de l'interior del difusor

Aquest nou disseny de la part interior del difusor la vaig fer partint de les mides de la Figura 43. Vaig trobar una nova imatge de la secció del ventilador Dyson que em va proporcionar unes mides més exactes. A part el vaig fer més alt per tal que s'adaptés a la nova secció d'entrada donada per la turbina. El diàmetre exterior del difusor és de 19 cm i l'alçada de 8 cm.

La part inferior del difusor segueix essent diferent a la de la imatge per tal de seguir imprimint les peces en dues parts i poder enganxar-les de forma pràctica. La impressió de la peça segueix essent, també, en la seva posició natural de vol, tal i com havia funcionat en les proves anteriors.

El resultat de la impressió va ser molt bo. Vaig poder extreure de forma fàcil els suports creats durant la impressió i no hi va haver cap punt on els filaments de plàstic es despreguessin. L'acabat superficial després del polit a mà va ser bo.

Cal destacar el llarg temps d'impressió. Les peces altes generalment són més lentes d'imprimir que les baixes. A part aquesta concretament presentava un diàmetre molt gran. Pràcticament el de tota la base d'impressió. Aquest fet fa que la impressora estigui molt temps desplaçant-se fent créixer de forma considerable el temps d'impressió. El temps total va ser del voltant d'unes 10 hores.

Exterior del difusor:

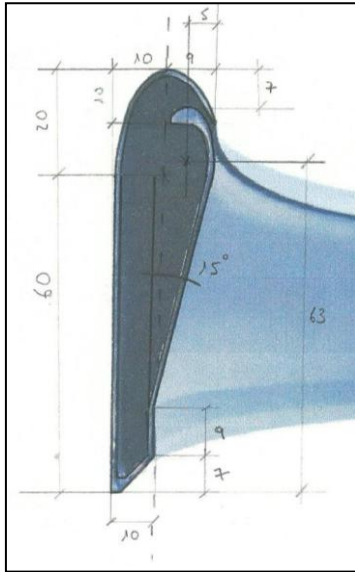


Figura 45: secció d'un ventilador Dyson

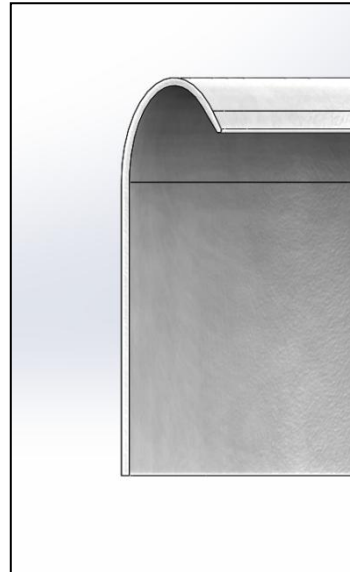


Figura 46: secció de l'exterior del difusor

El disseny de l'exterior del difusor presenta l'aspecte mostrat en la Figura 47. Com es pot veure a la imatge, el disseny de l'exterior és més baix que l'original. La diferència d'alçada ve donada per la modificació del difusor interior. La part del disseny que presenta més modificacions és la de fora.

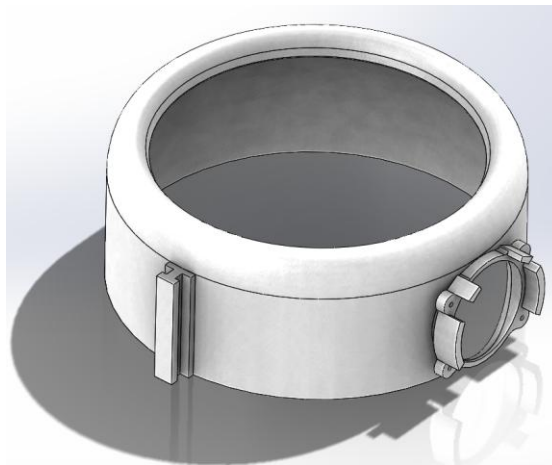


Figura 47: disseny de l'exterior del difusor

En primer lloc, l'entrada d'aire té un diàmetre interior de 50 mm. i un gruix de 2,5 mm. La unió amb el colze es duu a terme mitjançant 4 cargols amb les respectives 4 femelles de mètric 2,5. La part posterior per on entra el cargol és en forma d'hexàgon amb E/C de 5 mm. És la mida justa de la femella per tal d'evitar que giri el cargol en unir les dues parts. Detall mostrat en la Figura 48. Per garantir un bon centratge dels dos tubs hi ha quatre ressalts que l'ajuden a subjectar. Pel què fa a l'assemblatge entre difusors cada un d'ells compta amb un encaix a la part esquerra del disseny. Aquest es munta com si fos un puzzle. L'altre part que presenta el negatiu d'aquesta forma està situat en la part del colze que conté la turbina.

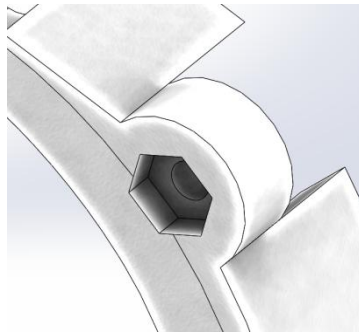
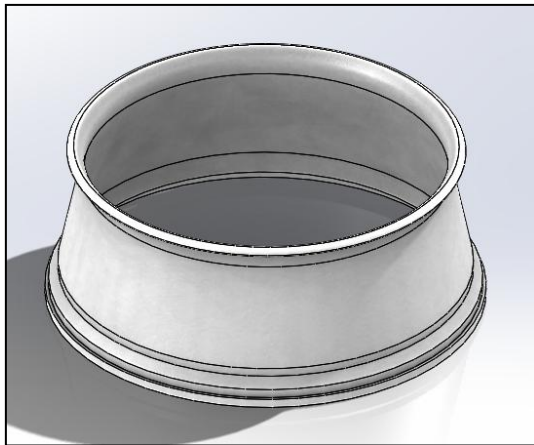


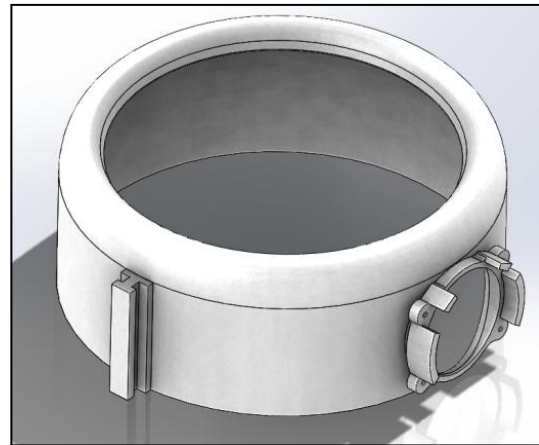
Figura 48: detall de la unió mitjançant femella

A l'hora d'imprimir la mateixa impressora va crear suports a l'interior de l'entrada d'aire del difusor. El resultat d'impressió va ser bo així com l'acabat superficial després del polit.

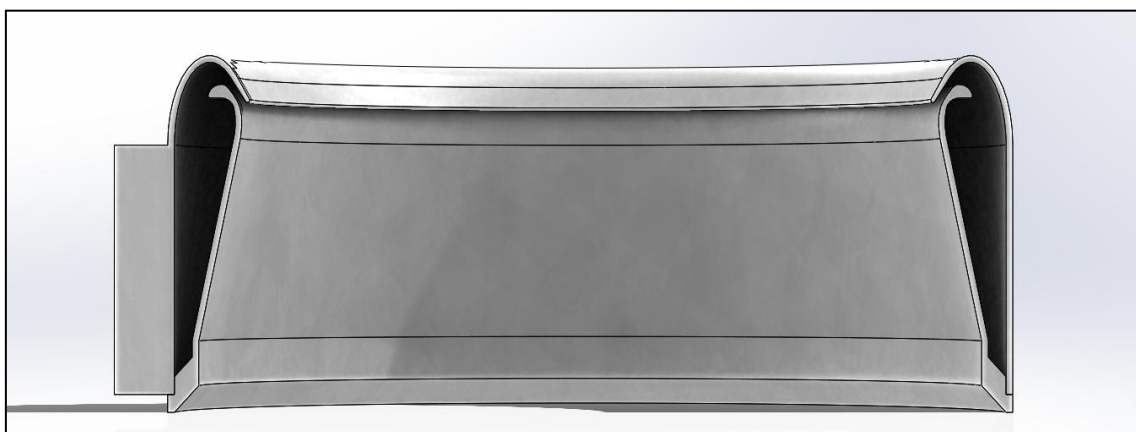
A la Figura 49 es mostren les dues parts que conformen el difusor i un tall de l'assemblatge general.



1_1_07



1_1_05



4_1_02

Figura 49: interior, exterior i secció del difusor

Colze en contacte amb el difusor:

Els colzes que dirigeixen l'aire de la turbina cap als difusors estan conformats per dues peces cada un. Quan vaig començar a dissenyar-los ja tenia certa experiència amb la impressió 3D i en començava a conèixer bé les limitacions. Així doncs, vaig crear dos dissenys que evitessin els possibles desprendiments de la peça al haver d'imprimir en un angle superior als 45° . Després de donar voltes a com havia de ser el disseny i el posicionament de la peça sobre la base a l'hora d'imprimir, em va venir al cap de partir la peça en dos. Un colze sencer forma un angle de 90° , així doncs, si el dividia en 2 estaria format per dos angles de 45° , fet que evitaria la creació de suports i el possible desprendiment de filaments durant la impressió.

El primer disseny que vaig crear va ser el que està en contacte amb el difusor. Està format per un tub de 50 mm de diàmetre interior que s'eixampla fins a 54 mm per donar lloc a un colze de 45° . Les parets són de 2,5 mm de gruix i consta de dos sistemes d'unió diferents. Un per unir el colze amb el difusor, i l'altre per unir les dues peces que formen el colze. Veure la secció amb l'eixamplament a la Figura 50.

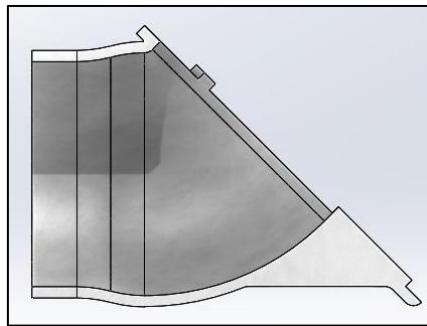


Figura 50: secció del colze en contacte amb el difusor

Tal i com he comentat anteriorment la unió es duu a terme mitjançant 4 cargols amb les respectives 4 femelles de mètric 2,5. Així doncs, en aquest disseny i hi ha els 4 forats que han de servir d'unió per els 4 cargols. El sistema d'unió entre colzes es basa en un ressalt més ample per tal d'augmentar la superfície d'adhesió. Aquesta superfície és de $1243,1 \text{ mm}^2$. Consta de 3 encaixos que en limiten el moviment, fet que augmenta de forma considerable l'adhesió de les dues peces al reduir la possible ruptura de l'adhesiu per cisallament.

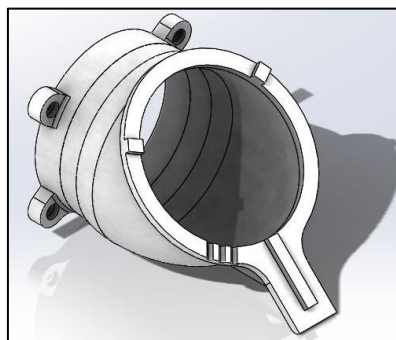


Figura 51: vista isomètrica del colze en contacte amb el difusor

A la Figura 51 podem veure una vista isomètrica del colze. La part on hi ha els 4 sortints amb els forats és la que va collada al difusor. La dels 3 sortints en canvi, va unida a l'altre part del colze. Per garantir unes bones qualitats mecàniques el punt d'unió entre els colzes queda subjectat per un nervi.

Tal i com he explicat l'objectiu del disseny d'aquesta peça és obtenir una bona impressió. Així doncs, el posicionament de la peça a l'hora d'imprimir és el mostrat en la Figura 52. El procés d'impressió segueix la seqüència de 6 imatges següents. Com es pot veure en tot moment l'angle d'impressió màxim de les zones més importants és de 45°.

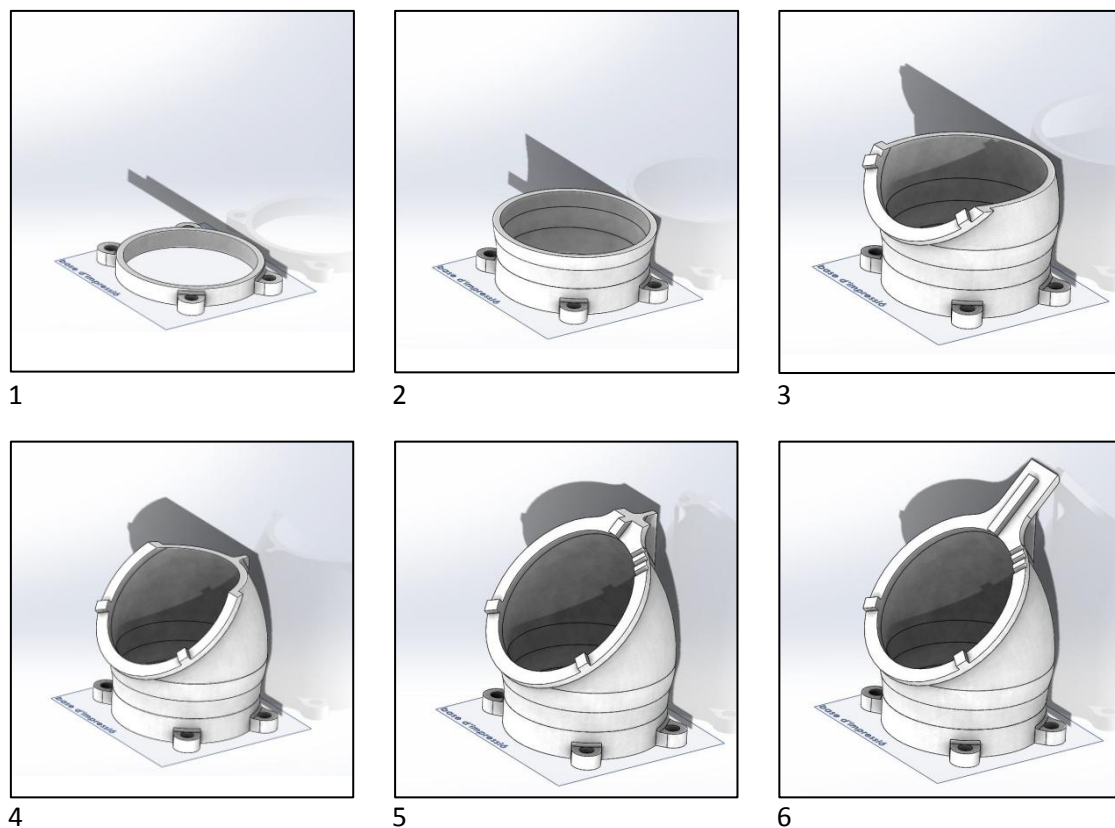


Figura 52: seqüència d'imatges corresponents a la impressió del colze en contacte amb el difusor

L'altre peça que conforma el total del colze és la que està en contacte amb la turbina. Tota ella té un diàmetre interior constant de 54 mm i està formada pel colze i el sortint que conté la turbina. El punt d'unió entre les dues parts del colze és l'explicat en la peça anterior. La diferència és que aquesta té el negatiu dels encaixos de l'altre peça per tal de formar juntes a la unió. Per garantir un bon posicionament de la turbina dins el tub, aquest porta una arrodonit amb el mateix radi que la turbina. Així doncs la turbina queda totalment agafada dins el tub.

Aquesta part del tub és la que uneix els difusors entre ells. Porta un encaix en forma de T que envolta el que hi ha situat als difusors. La unió mitjançant un encolat en garanteix una bona rigidesa. La unió entre les dues peces del tub porta un buidat per tal de minimitzar-ne el pes. El pes total del colze és de 272 g. En la Figura 53 es mostra el disseny de la peça amb tots els detalls esmentats.

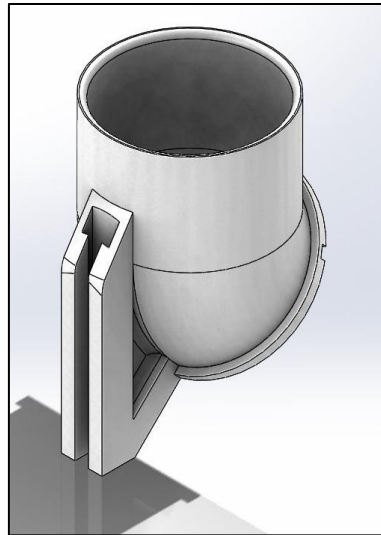


Figura 53: colze en contacte amb la turbina

Igual que en la peça anterior, la següent Figura mostra la seqüència d'impressió de la peça situada sobre la base d'impressió. Com en l'altre part del tub, el disseny i el posicionament garanteixen que no hi hagi cap punt amb un angle d'impressió superior als 45° .

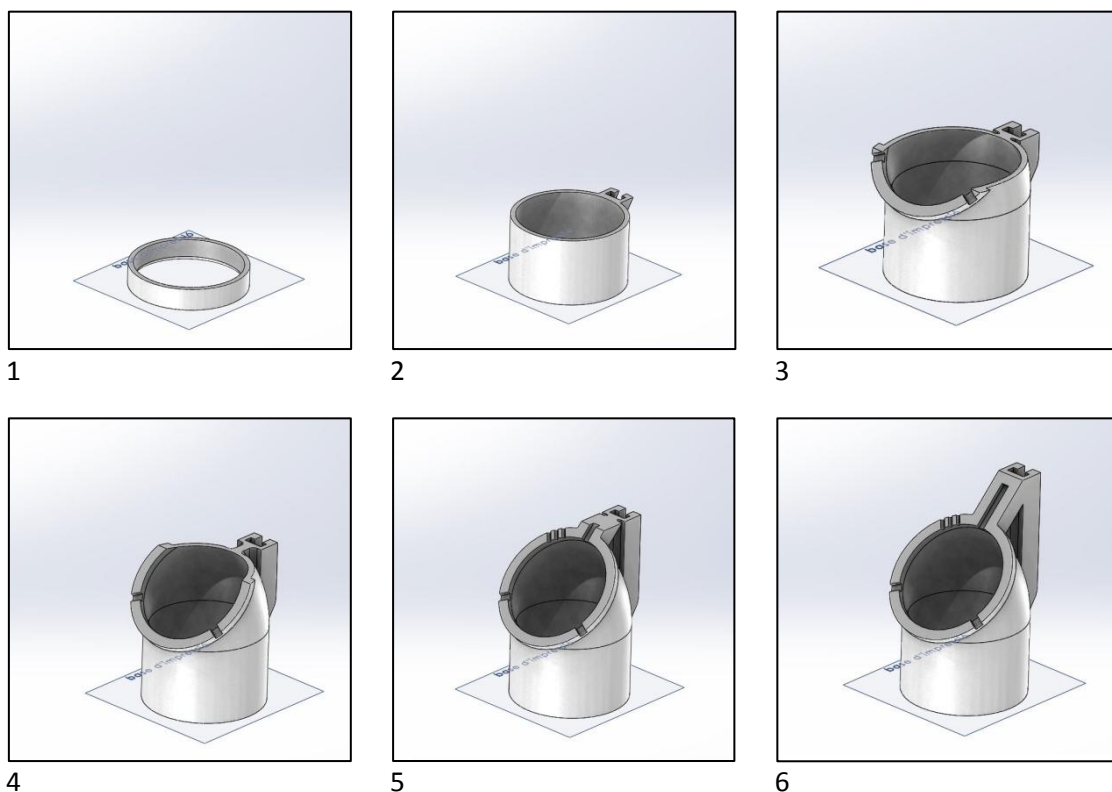


Figura 54: seqüència d'imatges corresponents a la impressió del colze en contacte amb la turbina

El resultat d'impressió de les dues peces va ser molt bo. Un cop impreses les vaig polir per aconseguir un bon acabat superficial i vaig repassar les parts que de la unió amb una llima. Un cop acabat aquest procés les dues peces encaixaven a la perfecció tot confeccionant així el colze definitiu.

7.4. Proves amb la turbina

Un cop vaig tenir impreses i polides les quatre peces que formen cada un dels difusors vaig procedir a muntar el difusor sencer. En la Figura 55 es mostra el seu assemblatge.

Les proves requerien del següent material:

- Aro interior del difusor
- Aro exterior del difusor
- Part del tub en contacte amb el difusor
- Part del tub en contacte amb la turbina
- Turbina
- Microcontrolador ESC⁹
- Una font d'alimentació
- Variador de velocitat



Figura 55: assemblatge per tal de fer proves amb el difusor

La primera prova va consistir en posar en funcionament la turbina dins de tot el sistema. Per fer aquestes proves vaig utilitzar un cotxe radio control que tenia a casa amb un motor amb unes prestacions similars a les de la turbina. Com a font d'alimentació vaig emprar les bateries del cotxe. El mateix cotxe portava el microcontrolador que feia girar la turbina utilitzant la palanca del gas del comandament del cotxe com a potenciòmetre. Un cop instal·lat vaig fer la primera prova. Aparentment vaig tenir la sensació que la turbina sola enviava molt més aire del que aconseguia treure el difusor. La primera comprovació que vaig fer va ser mirar el poder

⁹ Un **ESC** o **electronic speed control** és un circuit electrònic que té com a principal funció variar la velocitat d'un motor elèctric de forma precisa. És molt utilitzat en el món del radio control per a tot tipus d'aparells amb motors elèctrics. N'hi ha de molts tipus i mides diferents en funció de la velocitat màxima que volem que proporcioni al motor.

de succió de la turbina. Va ser en aquest moment en que vaig veure que la turbina escopia part de l'aire que succionava fet que demostrava que no donava una pressió suficient.

La segona comprovació que vaig dur a terme va ser veure si es produïa l'efecte venturi en la part posterior del difusor. Per fer-ho vaig col·locar el difusor en la mateixa posició de funcionament dels ventiladors Dyson. Posteriorment vaig situar petits trossos de *porexpan* al darrere del difusor mentre feia funcionar la turbina. A partir d'una distància d'uns tres dits els trossos de *porexpan* començaven a bellugar-se fins a sortir propulsades per l'interior del cercle. Aquest fet em va demostrar que tot i que el difusor no era capaç de treure una gran quantitat d'aire tenia certa força de succió en la part posterior fet que demostrava que funcionava l'efecte venturi.



Figura 56: comprovació de la succió del difusor mitjançant porexpan

Deixant de banda la petita succió que segons semblava proporcionava el difusor i en vista de la petita força aparent que era capaç de donar el sistema, vaig decidir mesurar-la. Per fer-ho vaig situar sota el difusor una balança encarregada de mesurar el pes que feia l'aire al sortir del difusor. Aquest pes seria el pes que es veuria capaç d'aixecar el difusor.

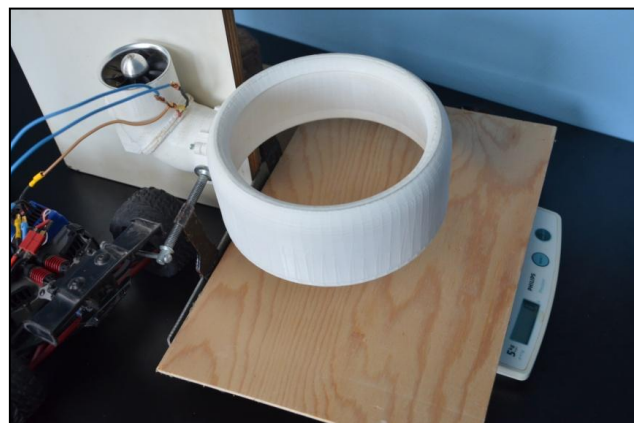


Figura 57: posicionament del difusor per tal de mesurar la sustentació produïda

El pes màxim que vaig obtenir en el muntatge de la Figura 57 va ser de 28 g. Un cop tenia tot el sistema muntat vaig aprofitar per fer altres proves. Un dels principals camins de millora era evitar que la turbina escopís l'aire. Per fer-ho vaig provar de situar un difusor molt senzill (un coll d'una ampolla de plàstic) a l'entrada d'aire de la turbina. Tot i no suposar una gran millora, el pes que vaig aconseguir amb aquest sistema va arribar fins a 37 g. En aquest moment vaig decidir crear 4 tipus de difusors diferents amb l'objectiu d'aconseguir augmentar la quantitat d'aire d'entrada a la turbina.

Dissenys dels difusors d'entrada a la turbina:

En vist que a aquestes alçades el projecte havia agafat un enfoc totalment experimental vaig decidir dissenyar 4 difusors en forma d'embut per tal d'evitar que l'aire sortís de l'entrada de la turbina. Aquests anirien situats a la part superior del colze. La diferència entre els difusors seria l'angle que formarien les parets del difusor amb la vertical.

Els angles dels dissenys són: 15° , 20° , 25° i 30° . Degut a la simplicitat de les peces les vaig imprimir a l'hora i en la seva posició natural, diàmetre gran a baix i diàmetre petit a dalt. En la Figura 59 es mostren les imatges de les 4 peces impreses.



Difusor d'entrada de 15°



Difusor d'entrada de 20°



Difusor d'entrada de 25°



Difusor d'entrada de 30°

Figura 58: imatges dels difusors impresos

El resultat d'impressió va ser molt bo. Tot i així les proves no van augmentar significativament la sustentació del model. Aquests són els valors obtinguts en les proves:

Muntatge	Valor obtingut per la balança en grams:
Turbina sola	234 grams
Turbina amb l'assemblatge bàsic	28 grams
Turbina amb l'assemblatge bàsic i el difusor d'entrada senzill	36 grams
Turbina amb l'assemblatge bàsic i el difusor d'entrada de 15°.	43 grams
Turbina amb l'assemblatge bàsic i el difusor d'entrada de 20°.	47 grams
Turbina amb l'assemblatge bàsic i el difusor d'entrada de 25°.	44 grams
Turbina amb l'assemblatge bàsic i el difusor d'entrada de 30°.	31 grams

Taula 8: Taula de resultats de les proves fetes amb la turbina i el difusor

Els valors obtinguts en les següents proves els vaig obtenir amb una bateria que proporcionava tan sols la meitat del voltatge. Tot i així van ser decisius a per veure que el sistema no funcionava. El primer planteig que em vaig fer va ser si la turbina emprada no era l'adequada. El fet que escupís l'aire em feia pensar que la turbina que estava utilitzant no em proporcionava suficient pressió. Va ser a partir d'aquest moment quan vaig decidir simular el que succeïa en l'interior del difusor.

A partir d'aquest punt el projecte pren un gir cap a la simulació i em proposo com a nou objectiu acabar determinant si seria factible fer volar un drone mitjançant el principi de propulsió vist fins ara.

7.5. Replantejament del projecte. Passos previs

Com a pas previ a les simulacions vaig a plantejar quins resultats necessitaria obtenir de les simulacions. A part vaig fer un petit estudi de les prestacions de les turbines i ventiladors que hi ha al mercat amb unes mides similars a les requerides.

Estudi de pesos:

Els càlculs proporcionats a continuació són una aproximació del que acabaria essent el disseny final i real del drone. El difusor pròpiament dit no variaria gaire el seu pes. Pel què fa als colzes en funció del tipus de turbina seria un incògnita. Igualment he fet una estimació del seu pes similar a la del disseny actual. L'objectiu està en assolir a partir de 3000 g. de sustentació. Fet així, encara que el pes real acabés essent un pel més gran tindria potència de marge com per fer sustentar el drone.

Component	Nombre de components	Pes individual (g)	Pes total (g)
Colze en contacte amb el difusor	4	26	104
Colze en contacte amb la turbina	4	42	168
Part interior del difusor	4	63	252
Part exterior del difusor	4	51	204
Turbina	4	100	400
ESC	4	38	152
Bateries	4	100	400
Ardupilot ¹⁰	1	50	50
Suports	1	200	200
Cablejat	1	50	50
Total:			1980 g.

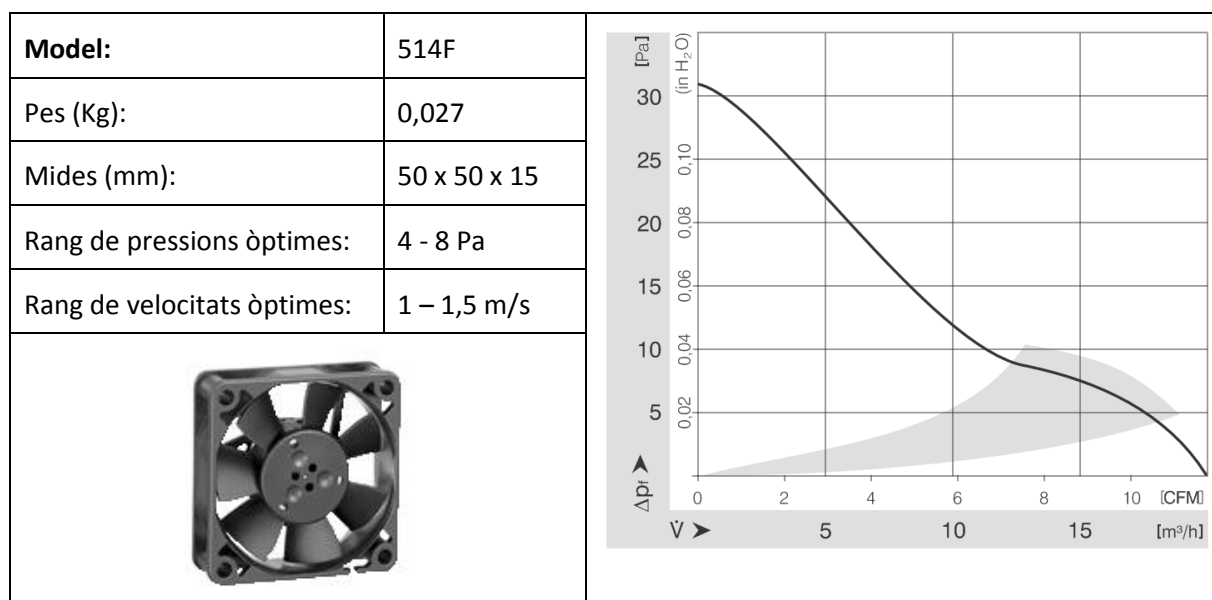
Taula 9: estimació del pes del prototip

Després d'aquesta aproximació pretenc aconseguir entre els 4 difusors superar amb un cert marge una sustentació com la del pes del drone per tal d'aconseguir que com a mínim s'elevi. Una bona fita seria aconseguir que cada un dels propulsors em generés una força neta d'entre 750 g. i 1000 g. Fet així aconseguiria una capacitat de sustentació d'entre 3000 g. i 4000 g.

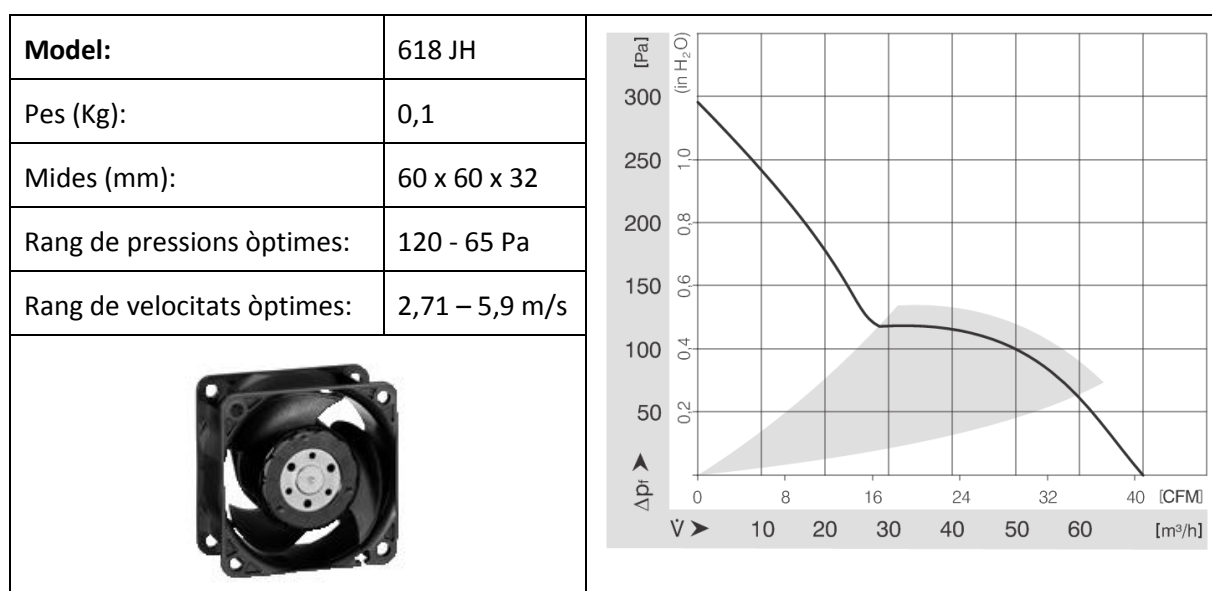
¹⁰ Pel control i l'estabilització del drone contaria amb un micro controlador de l'estil *Ardupilot*. El pes estimat és d'uns 50 grams.

Turbines:

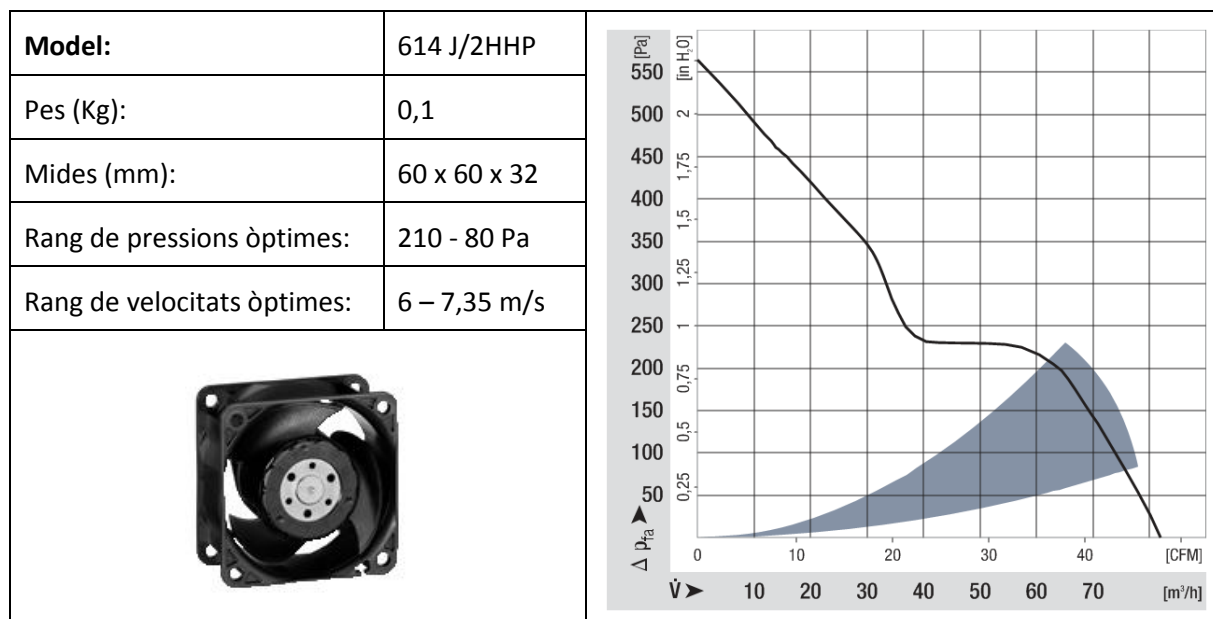
Aquest apartat pretén donar idea de quins són els ordres de magnitud de pressions i velocitats de turbines d'una mida propera a la necessària en el meu projecte. M'he fixat en el catàleg de l'empresa *Ebmpapst*. Començaré mostrant-vos varis tipus de turbines axials amb unes dimensions similars a les de la turbina mostrada en l'apartat 6.1 *Elaboració d'un disseny imprimible en 3D*.



Taula 10: taula de prestacions del model 514F



Taula 11: taula de prestacions del model 618 JH



Taula 12: taula de prestacions del model 614 J/2HHP

Com es pot veure en els models de ventiladors anteriors al rang de pressions proporcionades és ampli. En el camp de les velocitats màximes, en canvi, comptem amb un ventall de possibilitats més petit. En cada una de les gràfiques anteriors tenim marcat en gris la zona de treball òptim. És la zona on el ventilador es sent més còmode treballant i per tant ho fa de forma més eficient. En l'eix de les y tenim mostrades les pressions. Amb les últimes turbines podríem arribar a assolir pressions altes però com es pot veure en l'eix x, perdriem quasi bé tot el cabal. Per tal de calcular les velocitats que obtindríem en cada un dels models he dividit per l'àrea de sortida de cada un dels ventiladors. Els resultats són els mostrats en el rang de velocitats òptimes.

Dels 3 ventiladors mostrats, el model 614 J/2HHP és el que ens ofereix unes millors prestacions. Ens proporciona fins a 210 Pa a una velocitat de 6 m/s i 80 Pa a una velocitat de 7,35 m/s. A partir dels resultats obtinguts en les primeres simulacions determinaré la viabilitat del funcionament dels difusors.

8. Simulacions:

He dividit l'apartat de simulacions en dues parts. Per un costat simularé tot el que succeeix a l'interior del difusor i per altre com interacciona l'aire al sortir del propulsor. Un bon objectiu seria determinar quina velocitat i pressió d'entrada necessitaria per tal d'aconseguir una força de sustentació a sota de cada un dels difusors de 0,75 Kg. El procés per realitzar aquesta simulació és el següent. En primer lloc simularé quina velocitat necessito just a la sortida del difusor per tal d'obtenir els 750 grams de força desitjats. En aquesta simulació i intervindrà l'aire del medi on es trobi el difusor. Un cop obtinguda aquesta velocitat es tractarà de buscar quina velocitat i pressió necessito a l'entrada del difusor per tal d'assolir la velocitat a la sortida que em garanteix els 750 grams de sustentació per difusor. Aquesta velocitat i pressió obtingudes seran les que necessitaré que em proporcionï la turbina per tal de fer volar el drone. Un cop obtinguts aquests resultats els analitzaré per tal de determinar si és possible trobar una turbina de les dimensions requerides que sigui capaç d'oferir-me les prestacions necessàries.

Com que no he utilitzat mai l'*Ansys*, ni menys en concret el *Fluent*, aquest procés serà una mica llarg i laboriós. En primer lloc hauré d'aconseguir realitzar una simulació de l'interior i una de l'exterior amb uns resultats coherents. Un cop tingui creades les dues simulacions i funcionin, podré utilitzar-les per simular canviant varies condicions i així poder representar el que succeeix amb el difusor.

Durant el procés de simulació he generat moltes imatges i proves no incloses dins la memòria. Es poden trobar en format digital dins l'Annex 1.

8.1. Iniciació en la simulació mitjançant *Fluent*. Tutorial sobre la simulació d'una conducció en forma de colze.

El programari de simulació *ANSYS* era totalment nou per mi. Així doncs, el primer pas per tal d'iniciar-me en el món de les simulacions va ser la realització d'un tutorial que tenia certes similituds amb la simulació de l'interior del difusor. La simulació en qüestió consistia en veure com variava la velocitat d'un flux dins l'interior d'una canonada en forma de colze.

El tutorial el vaig extreure de la guia de funcionament del *Fluent*. En concret és l'*ANSYS Fluent Tutorial Guide*. Seguidament us faig una molt breu explicació de en què consistia i com l'he extrapolat al meu disseny.

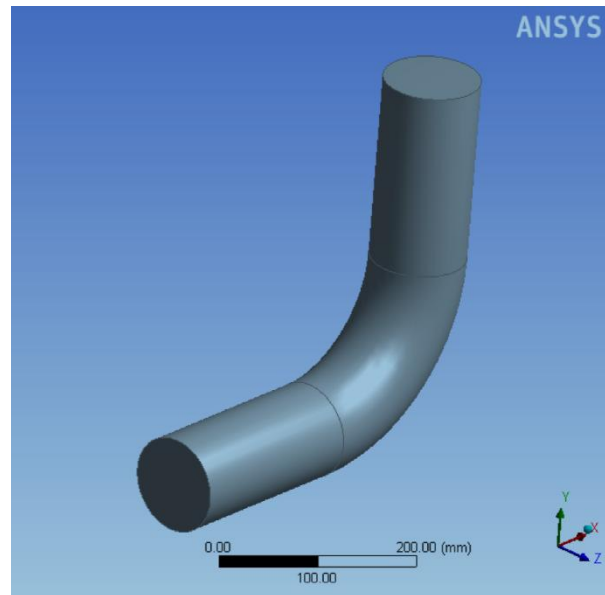


Figura 59: geometria de la simulació del tutorial

La simulació a realitzar és la mostrada en la Figura 59. Seguidament us mostro una breu interpretació dels resultats obtinguts. Com es pot veure en la Figura 60, *Ansys* mostra els resultats de forma molt intuïtiva. El colze presenta una entrada de fluid al sistema a una velocitat diferent a la de l'interior de la conducció. La velocitat d'entrada és més gran fet que fa augmentar la velocitat a l'interior del conducte. A l'escala de colors de l'esquerra podem veure el rang de velocitats del sistema. En aquest cas ens movem entre velocitats mínimes properes als 0 m/s i màximes d'1,37 m/s.

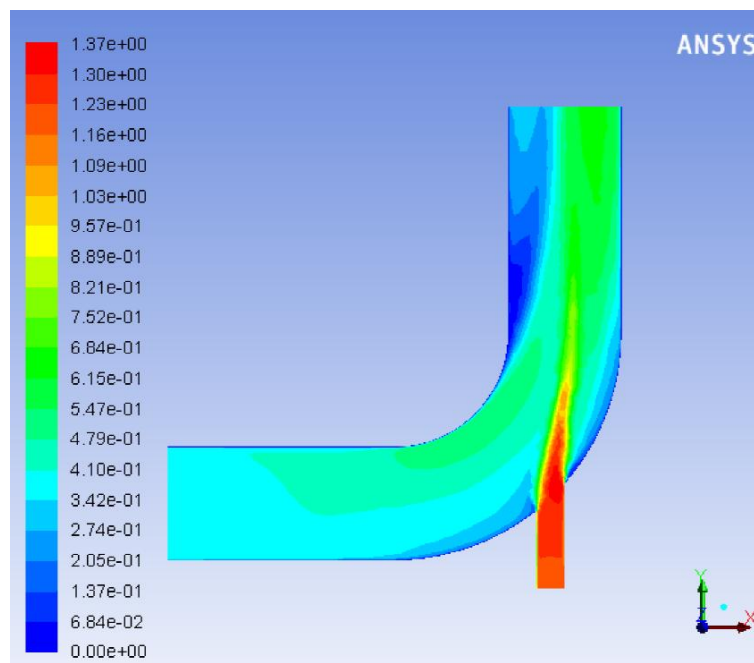


Figura 60: interpretació dels resultats obtingut

La simulació del colze em va servir per entendre i aprendre el procés per realitzar qualsevol simulació amb *Ansys*. Va ser la porta d'entrada a les simulacions que us mostraré a continuació.

8.2. Primera simulació de l'interior del difusor

Un cop obtinguts els primers resultats del tutorial, vist que aquests coincidien i tenint quatre nocions bàsiques de com simular em vaig llençar a la primera simulació del que succeïa a l'interior del difusor. Per fer-ho vaig començar canviant les condicions de contorn del model anterior per les del difusor. Així doncs, el primer pas va ser crear un nou disseny de *Solidworks*. Aquest cop no m'interessava simular amb la peça pròpiament dita, si no amb el volum d'aire interior d'aquesta. Un cop dibuixada la vaig poder obrir directament des de l'*ANSYS* mitjançant el format *.STEP*. Des de l'*ANSYS* mateix vaig mallar la peça i la vaig obrir de nou ja amb el *Fluent*. Va ser en aquest punt on vaig començar a modificar les condicions de simulació per al nou model. Vaig utilitzar com a model de turbulències el ja mencionat anteriorment $k-\epsilon$. El fluid de simulació era l'aire amb les respectives constants. El paràmetre amb el que vaig començar jugant era la velocitat d'entrada. En la primera simulació li vaig donar un valor de 14 m/s. Els resultats obtinguts van ser una velocitat promig de sortida de **31,37 m/s** amb una corresponent pèrdua de càrrega de **963,07 Pa**. Per tal de comprovar els resultats vaig fixar-me amb diferents representacions obtingudes. El primer que vaig generar va ser el que s'anomena un *Streamline*. El què mostra és la direcció i velocitat que prenen un número determinat de partícules a l'interior del fluid. El resultat és el mostrat en la Figura 62.

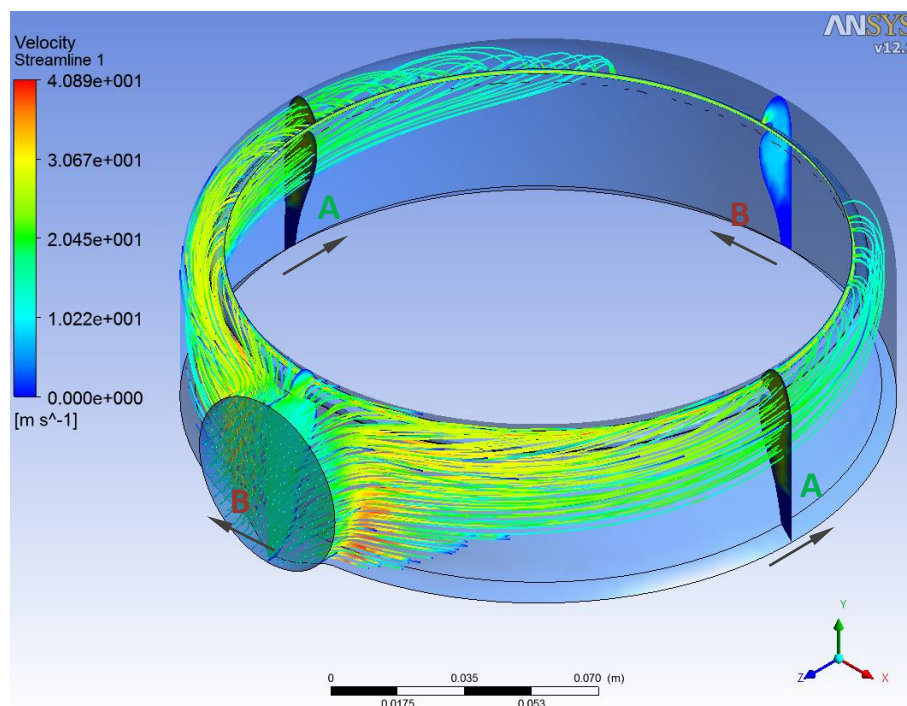


Figura 61: representació mitjançant *Streamline* del recorregut de les partícules dins el difusor

Com es pot veure les partícules es reparteixen de forma simètrica entre els dos braços del difusor tot dirigint-se cap a la secció més fina de sortida. A l'hora de crear qualsevol representació gràfica d'un resultat pots genera l'escala de colors de forma que s'adapti al màxim a les velocitats obtingudes. En aquest cas, després de jugar amb els valors màxims i mínims de l'escala la vaig definir amb els següents valors:

Velocitat mínima: 0 m/s

Velocitat màxima: 48,9 m/s

Així doncs, les línies vermelloses de la representació tendeixen cap als 48,9 m/s i com més blavoses són més s'acosten a una velocitat de 0 m/s.

Quan vaig veure el gràfic el primer dubte que em va sorgir va ser si la velocitat a la sortida del difusor no era uniforme. Pel que semblava a la part final pràcticament no arribava velocitat. Per comprovar-ho vaig generar un altre imatge; la distribució de velocitats en un pla secció. El pla en qüestió és el mostrat amb la lletra **A** en la Figura 61 i és la representació mostrada mitjançant la Figura 62.

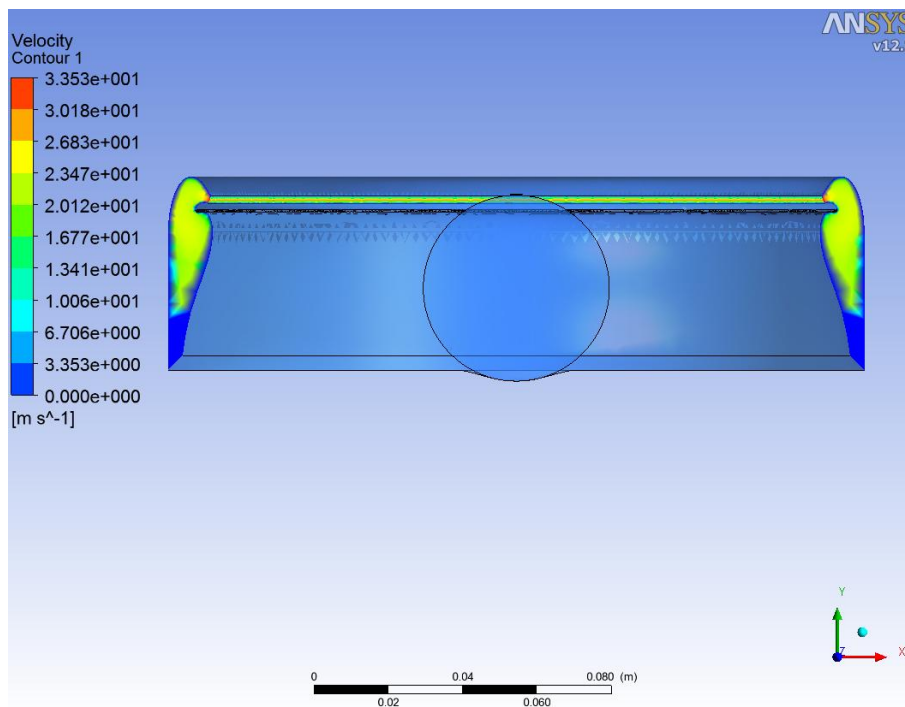


Figura 62: distribució de velocitats en un pla frontal del difusor

Com es pot veure en la Figura 62, les dues seccions formades entre el pla i el difusor són completament simètriques. Just a la part més propera a la sortida d'aire és on el fluid pren una velocitat més alta. És completament coherent als resultats que volia obtenir. Com més petita es fa la secció, més augmenta la velocitat. La velocitat en aquest punt pren un valor de fins a 33,53 m/s. Això significa un augment de la velocitat respecte l'entrada de 2,39 vegades. Pel que fa a la distribució uniforme a la sortida aquesta mateixa representació ens mostra la línia vermella a tota la part central de la sortida. Això ens indica que la velocitat es manté constant i es reparteix per igual en tota l'àrea de sortida.

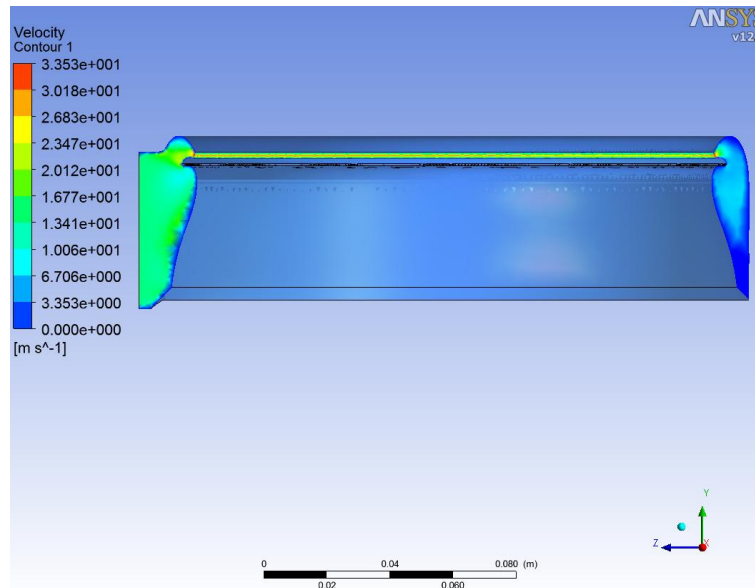


Figura 63: distribució de velocitats en un pla transversal del difusor

Per veure de forma més clara la representació de les velocitats en l'altre pla de secció vaig generar el gràfic corresponent a la secció transversal del difusor. A la Figura 61 es veu el pla de secció creat anomenat **B**. Com es pot veure la diferència bàsica es mostra en el repartiment de les velocitats en l'interior del difusor. Tal i com havia comentat la velocitat d'entrada en la simulació tenia un valor de 14 m/s. Aquesta velocitat correspon a la zona verd clar de la figura. Pel què fa a la zona de sortida del difusor, l'aire es mou a una velocitat de fins a 33,53 m/s, corresponent a la velocitat de la zona vermella de la imatge. Si ens fixem ara amb l'altre punta del difusor, la velocitat generalment pren un valor d'entre 3,35 m/s i 10,06 m/s. Ambdues corresponen als colors blau fosc i blau clar de la representació. Tot i així, la sortida manté el valor de 33,35 m/s fet que reafirma la homogeneïtat de velocitats en la sortida.

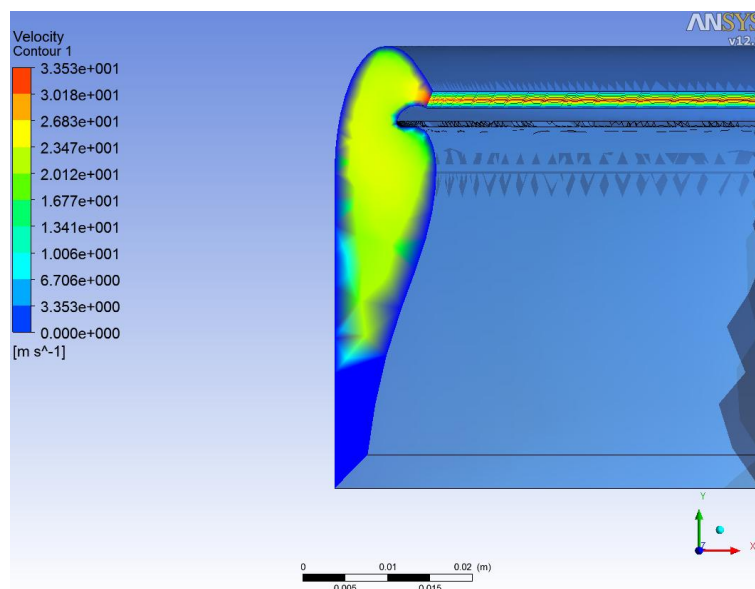


Figura 64: visió de detall de la distribució de velocitats situada en pla A

Finalment en la visió de detall de la secció **A** mostrada en la Figura 64 podem veure la distribució de velocitats. Generalment pren un valor d'uns 26,83 m/s en excepció de just a la punta de la sortida que és on l'aire assoleix més velocitat.

En un cas ideal el millor seria tenir una velocitat a tot l'interior del difusor el més baixa millor. Si recordem, a l'apartat de fonaments del treball hem vist que les pèrdues són funció quadràtica de la velocitat. Així doncs es tracta d'obtenir velocitats baixes a l'interior per minimitzar pèrdues i grans velocitats just a la sortida del difusor, lloc on ens interessa generar la posterior depressió.

8.3. Primera simulació de l'exterior del difusor

Un cop feta la primera prova de la simulació de l'interior vaig començar a experimentar amb què succeïa a l'exterior. Per fer-ho vaig realitzar una nova simulació, on aquest cop, el que m'interessava era veure com interactuava l'aire de l'exterior quan hi aplicava una velocitat de sortida del mateix valor a la obtinguda en la simulació anterior. El primer pas va ser el disseny mitjançant *Solidworks* del volum d'aire exterior al difusor. El volum havia de ser suficientment gran com perquè els límits del disseny no afectessin als resultats obtinguts en forma de recirculacions. Val a destacar que el *Fluent* detecta tots els límits d'un volum de fluid com si estiguessin delimitats per una paret. La condició que utilitza el programa per tenir en compte que hi ha una paret és que la velocitat just al límit sempre val 0. És per això que era imprescindible tenir les parets al màxim allunyades del disseny. Per contra, com més gran era el volum més elements s'havien de mallar. Aquest fet feia augmentar considerablement el temps de càlcul, fins al punt que l'ordinador no podia arribar a calcular. Així doncs, el disseny va ser un equilibri entre un volum suficientment gran com perquè les parets no afectessin els resultats, i suficientment petit com per poder aplicar un mallat al màxim precís sense augmentar en excés el temps de càlcul i molt menys arribar a saturar l'ordinador.

Per dissenyar el volum de control a simular vaig començar dibuixant amb el *Solidworks* un cilindre allargat. El procés següent consistir en situar-me en un pla de secció que passés pel centre del cilindre. Va ser allà on hi vaig fer el croquis corresponent a la geometria externa del difusor. Un cop dibuixat, el procés per tal d'obtenir la resta dels dos volums va consistir en fer un tall en forma de revolució del disseny creat.

Per tal de minimitzar temps de càlcul i recursos a l'hora de calcular des del *Fluent* vaig simplificar la peça a la meitat mitjançant una simetria. Totes les representacions mostrades a continuació seran de la meitat del volum de control.

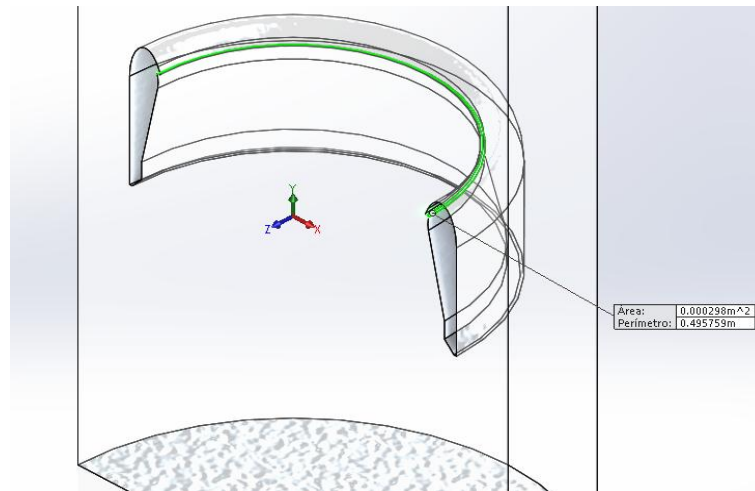


Figura 65: volum de control de l'exterior del difusor

A la Figura 65 es mostra el disseny del volum de control d'aire exterior al difusor. És mig cilindre on li hem restat el volum del difusor. La franja marcada en verd és des d'on s'aplica la velocitat d'entrada al sistema. Aquesta primera simulació li vaig donar una velocitat d'entrada de 31,37 m/s, la obtinguda en la simulació de l'interior. Tal i com comentava una forma de disminuir el volum a malla és aplicar una simetria. És per això que només es mostra la meitat del difusor.

Anàlisi dels resultats obtinguts:

Un cop passat el temps de càlcul el primer que vaig fer ser generar una representació de la velocitat per tal de comprovar si el difusor duia a terme la seva feina. Propulsar l'aire cap avall tot creant l'efecte Venturi. El pla on vaig crear la representació va ser a la simetria del disseny. Era un punt des del qual podia veure com afectava la velocitat de sortida al interactuar amb l'entorn.

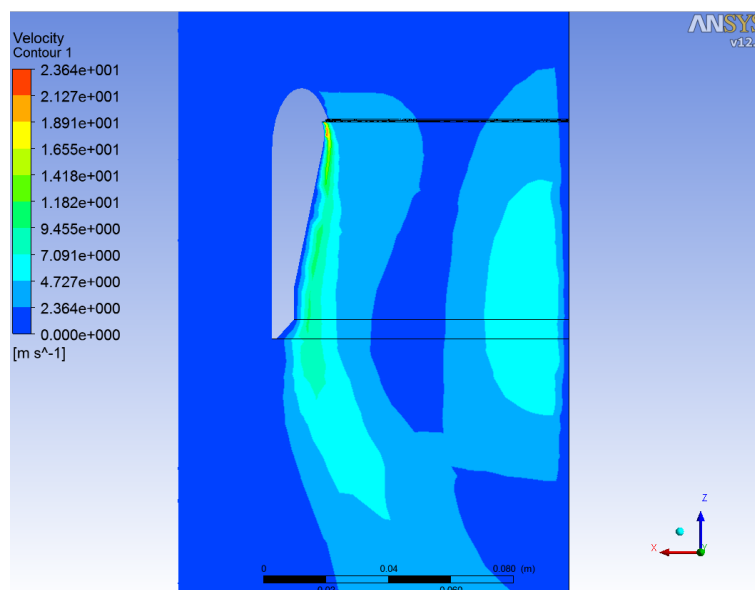


Figura 66: representació de la distribució de velocitats en una secció del volum de control

Com es pot veure a la Figura 66, l'aire surt a molta velocitat del difusor tot donant velocitat al que l'envolta. El sistema inicialment es troba a una velocitat de 0 m/s. La velocitat de sortida de l'aire accelera el que troba tot assolint velocitats d'entre 4,72 m/s i 9,45 m/s. Aquest volum més gran d'aire a una certa velocitat és el que teòricament hauria de proporcionar la sustentació al difusor. Un cop comprovat el bon funcionament del difusor el següent pas va ser buscar la velocitat mitjana de l'aire just al desprendre's de l'ala. Per fer-ho vaig generar un pla on calcular aquesta velocitat mitjana. A la **figura** podem veure de color blau el pla creat. La velocitat mitjana obtinguda té un valor de **3,10 m/s**.

El pla de color verd és el que vaig generar per obtenir la velocitat promig abans d'entrar a difusor. Aquesta pren un valor de **1,23 m/s**.

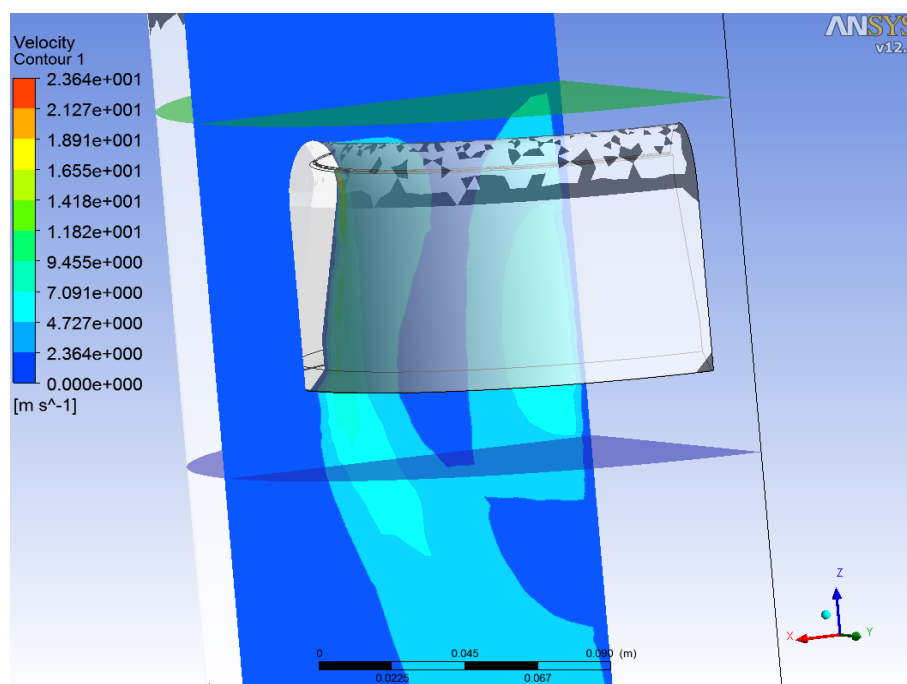


Figura 67: plans creats per tal de calcular el promig de velocitats a sobre i a sota el difusor

A l'hora d'extreure dades de les pressions que afecten el difusor he generat la següent representació. Tal i com es preveia la zona interior del difusor és una zona de baixes pressions. Aquestes baixes pressions són les que provoquen que el fluid es desplaci per l'interior del difusor tot propulsant-lo cap avall. Tota aquesta zona té una pressió bastant homogènia d'uns -10 Pa. Com a fruit de les baixes pressions, l'aire un cop surt d'aquesta zona genera una zona sota el difusor de pressions més altes. És la zona marcada en colors grogosos i vermellorsos. Pren valors del voltant dels 5 Pa. Aquesta diferència de pressions ens generarà una altre força que teòricament ens ajudarà a sustentar el model. He extret les dades de pressions a partir dels plans inferior i superior de la Figura 68.

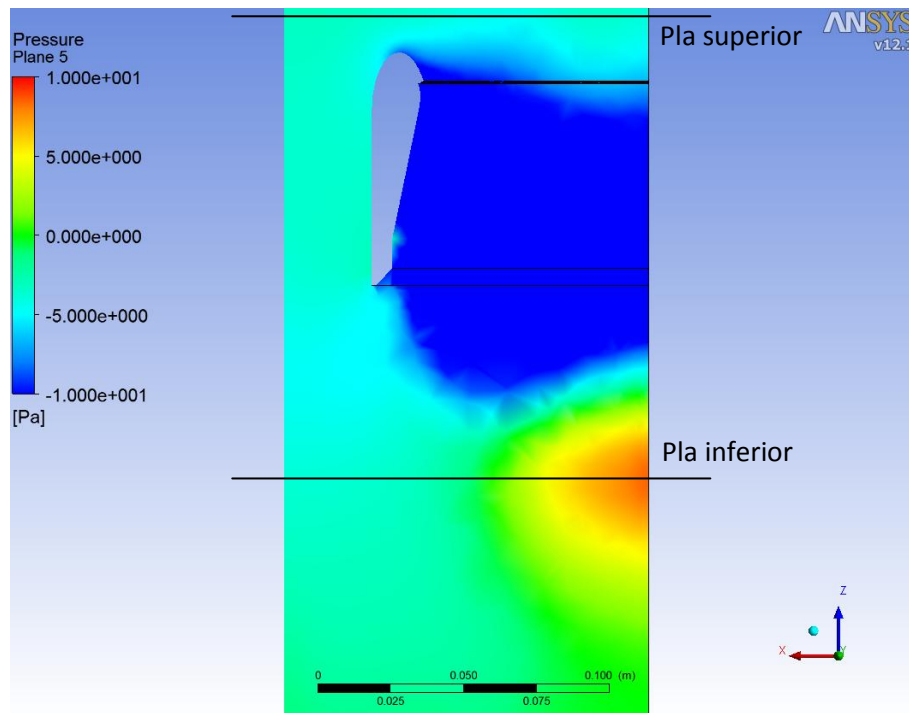


Figura 68: representació de la distribució de pressions en una secció del volum de control

Un cop obtingudes les diferències de velocitat i pressió entre la part superior i inferior del difusor el següent pas va ser veure la força de sustentació que generaven. El *Fluent* no té un mòdul específic que calculi les forces aparegudes en un sistema com el mostrat. Així doncs vaig haver d'endinsar-me en el càlcul per tal de trobar els valors de les forces provocades per la diferència de pressions i per la diferència de velocitats. En el següent apartat en mostro els detalls.

8.4. Càlcul de la sustentació

A partir dels resultats obtingut de la simulació de l'exterior del difusor podem calcular una aproximació de la força de sustentació que es genera. Ho fem per la suma dels resultats obtinguts al aplicar el principi de conservació de la quantitat de moviment en el difusor i per la diferència de pressions entre l'entrada i la sortida d'aquest mateix. Comencem veient com afecte la variació de velocitat a l'hora de generar una força de sustentació.

Conservació de la quantitat de moviment:

Partim del diagrama mostrat en la Figura 69.

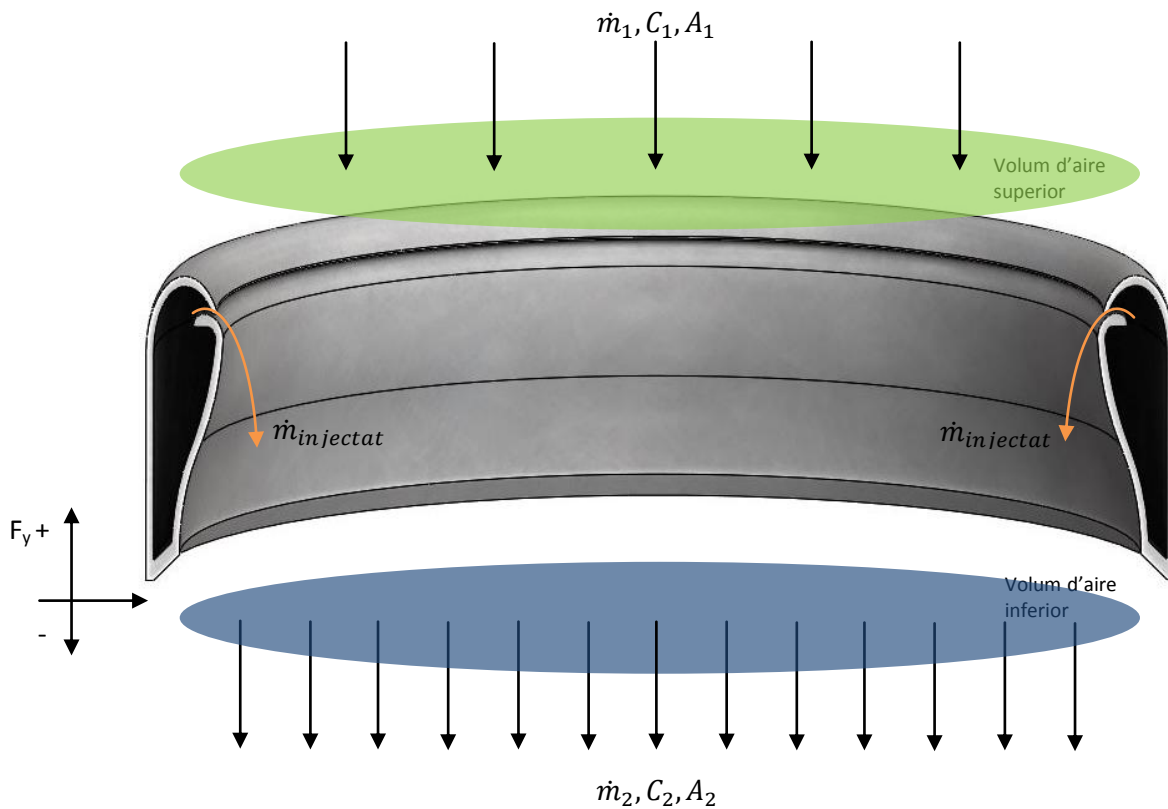


Figura 69: representació dels cabals i les àrees que interactuen amb el difusor

El volum d'aire superior es troba inicialment en repòs. La velocitat C_1 és fruit de la depressió creada per $\dot{m}_{injectat}$. Conseqüentment, al volum d'aire inferior ens apareix una velocitat C_2 . Ambdues velocitats les podem trobar a partir de la simulació de l'exterior del difusor. L'equació que relaciona els fluxos d'entrada i sortida és la següent:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{injectat}$$

Ec. 18 expressió per a la relació de cabals

Aplicant la conservació de la quantitat de moviment podem extreure la següent expressió:

$$\sum F_y = \sum m_i \cdot \frac{dv}{dt} = -\dot{m}_1 \cdot C_1 + \dot{m}_2 \cdot C_2 \quad \text{on: } [F_y] = Kg \cdot \frac{m}{s^2} = N$$

Ec. 19 aplicació de la llei de la conservació de la quantitat de moviment al difusor

Podem dur a terme la següent aproximació:

$$\dot{m}_1 = C_1 \cdot \rho_{aire} \cdot A_1$$

Ec. 20 aproximació per a \dot{m}_1

$$\dot{m}_2 = C_2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_2$$

Ec. 21 aproximació per a \dot{m}_2

Així doncs:

$$\sum F_{y\ q.m.} = -C_1^2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_1 + C_2^2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_2$$

Ec. 22 sumatori de forces en y basades en l'aplicació de la quantitat de moviment

On:

C_1 és la velocitat de l'aire a la part superior del difusor

C_2 és la velocitat de l'aire a la part inferior del difusor

$A_1 = A_2$ ja que a l'hora d'extreure les velocitats promig des del Fluent les calculem per a una mateix secció.

La $F_{y\ q.m.}$ obtinguda serà la força de sustentació que ens generarà el difusor degut al canvi de velocitats del volum d'aire superior i inferior.

Diferència de pressions:

Igual que en el principi de la conservació de la quantitat de moviment partim de la Figura 69. En aquest cas ens interessa saber la força que provoca la diferència de pressions entre el volum d'aire superior i inferior. La força generada serà:

$$F_{y\ d.p.} = P_{inferior} \cdot A_{inferior} - P_{superior} \cdot A_{superior}$$

Ec. 23 sumatori de forces en y basades en l'aplicació de la diferència de pressions

On:

$P_{superior}$ és la pressió de l'aire a la part superior del difusor

$P_{inferior}$ és la velocitat de l'aire a la part inferior del difusor

$A_1 = A_2$ ja que a l'hora d'extreure les pressions promig des del Fluent les calculem per a una mateix secció.

La $F_{y\ d.p.}$ obtinguda serà la força de sustentació que ens generarà el difusor degut al canvi de pressions entre el volum d'aire superior i inferior.

La força de sustentació total del model serà la suma de les dues:

$$F_{sustentació\ total} = F_{y\ q.m.} + F_{y\ d.p.}$$

Ec. 24 sustentació total generada

Càlcul a partir de les dues primeres simulacions de prova:

A partir dels valors mostrats en l'apartat 7.3 *Primera simulació de l'exterior del difusor* calculem la sustentació provocada per el canvi de velocitats. Els valors eren els següents:

$$C_1 = 3,1 \text{ m/s}^2;$$

$$C_2 = 1,23 \text{ m/s}^2;$$

$$A_1 = A_2 = 0,049 \text{ m}^2 ;$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1,225 \text{ Kg/m}^3$$

Així doncs:

$$\sum F_{y \text{ q.m.}} = -(1,23^2 \cdot 1,225 \cdot 0,049) + 3,1^2 \cdot 1,225 \cdot 0,049 = -0,0908 + 0,5768$$

Ec. 25 aplicació de l'Ec. 22

$$F_{y \text{ q.m.}} = 0,4859 \text{ N} \rightarrow F_{y \text{ q.m.}} = 0,0495 \text{ Kg}$$

La diferència de velocitats del difusor ens proporciona una sustentació de **49,5 g**.

Anem a calcular ara la sustentació provocada per el canvi de pressions. Els valors obtinguts són els següents:

$$P_{\text{superior}} = -3,88 \text{ Pa};$$

$$P_{\text{inferior}} = -1,72 \text{ Pa};$$

$$A_1 = A_2 = 0,049 \text{ m}^2 ;$$

$$F_{y \text{ d.p.}} = P_{\text{inferior}} \cdot A_{\text{inferior}} - P_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior}} = -1,72 \cdot 0,049 - (-3,88 \cdot 0,049)$$

Ec. 26 aplicació de l'Ec. 23

$$F_{y \text{ d.p.}} = 0,1058 \text{ N} \rightarrow F_{y \text{ d.p.}} = 0,0108 \text{ Kg}$$

La diferència de pressions del difusor ens proporciona una sustentació de **10,8 g**.

Un cop aplicats els dos principis i obtinguts els dos valors de la sustentació anem a calcular la sustentació total:

$$F_{\text{sustentació total}} = F_{y \text{ q.m.}} + F_{y \text{ d.p.}}$$

Ec. 27 aplicació de l'Ec. 24

$$F_{\text{sustentació total}} = 49,5 + 10,8 = 60,3 \text{ g}$$

Per extreure conclusions de la primera simulació duta a terme ho faré mitjançant la taula següent:

Velocitat aire turbina:	Pèrdua de càrrega del difusor:	Velocitat sortida difusor:	Velocitat promig sota el difusor:	Diferència pressió	Sustentació velocitats	Sustentació pressions	Sustentació total
14 m/s	963,07 Pa	31,37 m/s	3,1 m/s	2,16 Pa	49,5 g	10,8 g	60,3 g

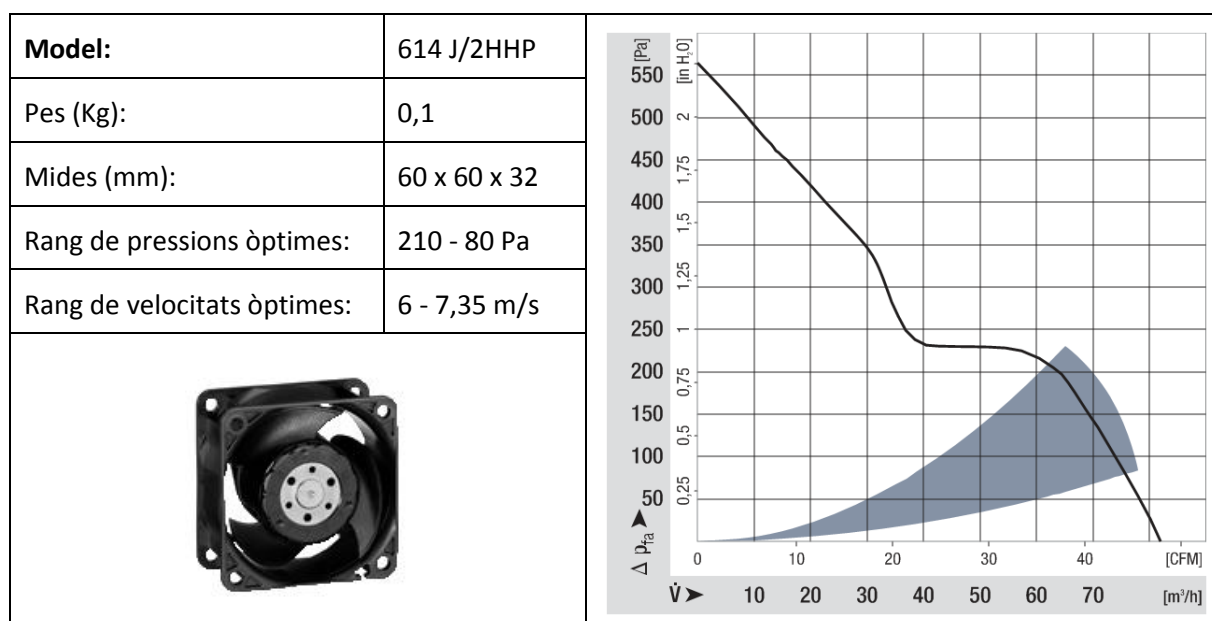
Taula 13: resultats obtinguts a partir de la primera simulació total del difusor

Partíem d'una velocitat d'entrada al difusor de 14 m/s. Aquesta teòricament la proporcionava una turbina. Aquesta velocitat després de circular per l'interior del difusor sotmetent-se a una pèrdua de càrrega de 963,07 Pa ens proporciona una velocitat de sortida del difusor de 31,37 m/s. Amb aquesta velocitat el difusor és capaç de crear un promig de velocitats a tota l'àrea de sota el difusor de 3,1 m/s que provoca una força de sustentació de 49,5 g. Al mateix moment ens genera un gradient de pressions de 2,16 Pa provocant així una sustentació de 10,8 g. La sustentació total del model és de 60,3 g.

Després de tot el procediment, podem concloure que una turbina que sigui capaç de generar 14 m/s i proporcioni una pressió mínima de 963,07 Pa, ens proporcionarà una sustentació de 60,3 g. En el següent apartat extrauré les primeres conclusions sobre el funcionament.

8.5. Primeres conclusions sobre el funcionament

Per tal de comprovar la viabilitat del funcionament dels difusors anem a comparar el funcionament de les turbines o ventiladors amb els requeriments del sistema dissenyat. Partiem del següent ventilador:



Taula 14: taula de prestacions del model 614 J/2HHP

L'ordre de magnitud de les pressions proporcionades era d'un màxim de 550 Pa. Per sobre la turbina ja no generava velocitat. Val a dir que la pressió màxima òptima voltava els 210 Pa. Pel què fa a les velocitats, a la simulació partíem d'una velocitat d'entrada de 14 m/s. A la gràfica del ventilador, torbàvem el límit al voltant del 80 m³/h, corresponents a una velocitat de 7,86 m/s. Certament, a aquesta velocitat el ventilador és incapaç de generar pressió. Al rang òptim, ens oferia una velocitat màxima de fins a 7,35 m/s.

Per realitzar un anàlisi dels resultats més visual ho faré en la següent taula:

	Velocitat	Pressió	Sustentació
Proporcionada pel ventilador:	6 - 7,35 m/s	210 - 80 Pa	Molt inferior als 60 g.
Requerida:	14 m/s	963,07 Pa	60,3 g

Taula 15: taula d'anàlisi de resultats obtinguts

Com es pot veure el ventilador es queda molt lluny d'obtenir uns valors propers als requerits per tant sols genera 60,3 g. de sustentació. Recordem que el propòsit per tal de fer volar el drone era superar amb escreix els 2 Kg de pes del drone tot assolint valors de sustentació del voltant de 3 Kg totals. Per aconseguir-ho cada un dels difusors havia de generar al voltant de 750 g. Si el ventilador ha quedat lluny de generar-ne 60 g, podem concloure la inviabilitat del projecte, si més no, utilitzant aquest tipus de difusor concret.

8.6. Què faria falta per fer volar un drone partint del disseny anterior?

Vista la no viabilitat del projecte i per tal de tancar-lo tenint una idea més clara del funcionament dels difusors, vaig acabar realitzant unes últimes simulacions. Vaig voler obtenir gràfiques de la reacció dels dos models, l'interior i l'exterior, per a un ventall de velocitats i pressions impossibles d'obtenir a la realitat del projecte. Si bé no eren possibles, eren les teòricament necessàries per tal de fer sustentar el drone. Així doncs, us presento 5 simulacions realitzades a l'interior del difusor i 5 a l'exterior. A la següent taula podem fer un cop d'ull a les dades inicials de les simulacions dutes a terme:

Interior del difusor			Exterior del difusor		
Nom de la simulació a l'Ansys:	Velocitats teòriques proporcionades per la turbina:		Nom de la simulació a l'Ansys:	Velocitats teòriques assolides a la sortida del difusor:	
Turbina 15 m/s	15	m/s	Exterior 30 m/s	30	m/s
Turbina 30 m/s	30	m/s	Exterior 50 m/s	50	m/s
Turbina 45 m/s	45	m/s	Exterior 70 m/s	70	m/s
Turbina 60 m/s	60	m/s	Exterior 90 m/s	90	m/s
Turbina 75 m/s	75	m/s	Exterior 110 m/s	110	m/s

Taula 16: resum de les simulacions dutes a terme

Per tal d'explicar-les de forma ordenada i coherent començaré comentant la reacció de l'interior del sistema amb les diferents velocitats donades, seguiré mostrant com es comporta l'exterior del difusor i finalment acabaré ajuntant els dos anàlisis per tal de lligar les dues simulacions fetes en una.

8.7. Comportament de l'interior del difusor per a una gamma de velocitats d'entrada de 15 m/s a 75 m/s

El mètode d'estudi del comportament del fluid en l'interior del difusor es va basar en el següent procés. En primer lloc vaig realitzar les 5 simulacions corresponents a les de la Taula 20. Un cop simulat, el primer pas va ser obtenir les diferents velocitats per a cada una de les velocitats d'entrada. Aquesta distribució de velocitats em va servir per tal de poder dibuixar gràfiques que em relacionessin com es comportava la velocitat de sortida del fluid.

Interpretacions de les velocitats obtingudes:

A la següent taula es mostren els resultats obtinguts:

Velocitats d'entrada al sistema		A entrada		A sortida		Velocitats de sortida del difusor		Velocitats de sortida en Km/h	
15	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	33,17	m/s	119,4120	Km/h
30	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	66,05	m/s	237,7800	Km/h
45	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	99,05	m/s	356,5800	Km/h
60	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	132,05	m/s	475,3800	Km/h
75	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	164,93	m/s	593,7480	Km/h

Taula 17: taula corresponent a la velocitats obtingudes a la sortida del difusor

L'àrea d'entrada i sortida són les obtingudes mitjançant els dissenys amb el *Solidworks*. Com es pot veure en cada una de les simulacions fetes hem aconseguit una velocitat de sortida major a la d'entrada. Això és una mostra del correcte funcionament del difusor. Una forma més visual d'interpretar les dades obtingudes és mitjançant una gràfica de velocitats de sortida en funció de les d'entrada. Com es pot veure a la figura 70, les velocitats creixen de forma lineal.

Tal i com comentava al principi del punt 7.6 *Què faria falta per fer volar un drone partint del disseny anterior?*, les velocitats tant d'entrada com de sortida són impossibles d'obtenir en un model de les dimensions com les del projecte. Tot i així ens donen una idea de fins on s'hauria d'arribar per tal d'aconseguir el funcionament del drone.

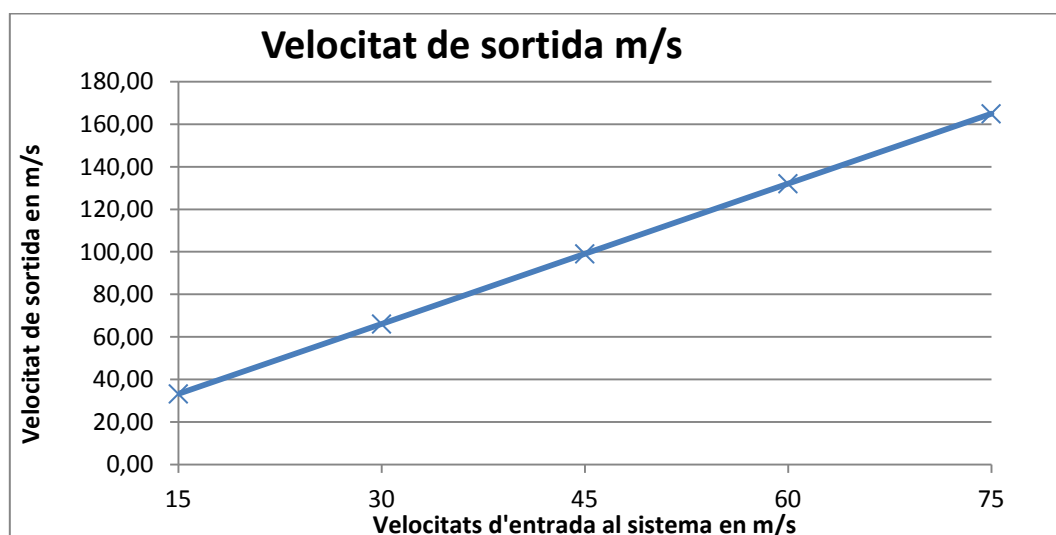


Figura 70: representació de les velocitats obtingudes per a cada simulació realitzada

Interpretacions de les pèrdues de càrrega obtingudes:

Si en l'apartat anterior les velocitats havien mostrat un comportament lineal, les pressions havien de mostrar un comportament no lineal. Recordem que la pèrdua de càrrega augmenta no linealment en funció de la velocitat. Així doncs, en la següent taula mostro els resultats obtinguts de les pèrdues de càrrega del sistema per a cada una de les velocitats d'entrada donades:

Velocitats d'entrada al sistema		A entrada		A sortida		Pèrdua de càrrega del sistema		Pèrdua de càrrega del sistema	
15	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	921,61	Pa	0,92161	kPa
30	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	3522,72	Pa	3,52272	kPa
45	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	7749,07	Pa	7,74907	kPa
60	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	13622,10	Pa	13,6221	kPa
75	m/s	1,96E-03	m ²	5,96E-04	m ²	21122,20	Pa	21,1222	kPa

Taula 18: taula corresponent a les pèrdues de càrrega obtingudes a l'interior del difusor

Si dibuixem la gràfica dels resultats obtinguts ens apareix la següent corba. Tal i com comentàvem, el comportament de les pressions no és lineal. El mostro en la figura.

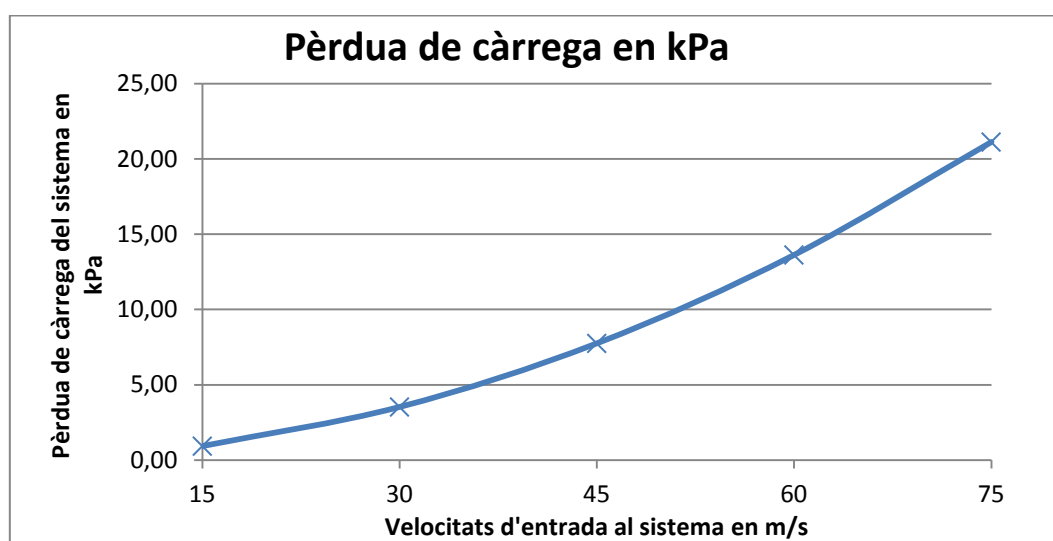


Figura 71: representació de les pèrdues de càrrega obtingudes per a cada simulació realitzada

Interpretació de les representacions generades:

A tall representatiu i per tal de comprovar la correcta circulació del fluid per l'interior del difusor a cada una de les velocitats de càlcul, vaig generar un *Streamline* de cada una de les simulacions. Vaig crear una escala de colors personalitzada i igual per a tots els dissenys per tal de poder comparar gràficament els colors representats. L'escala en qüestió va dels 0 m/s als 110 m/s. Les figures de la 72 a la 77 mostra els 5 resultats obtinguts.

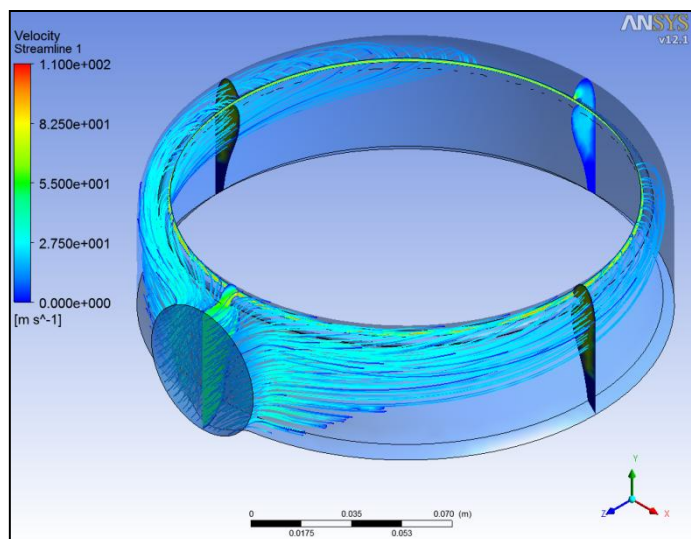


Figura 72: Streamline. Velocitat d'entrada de 15 m/s

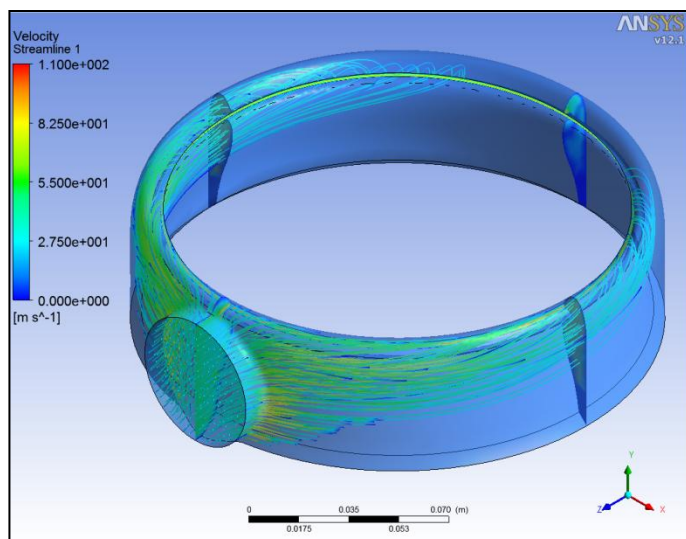


Figura 73: Streamline. Velocitat d'entrada de 30 m/s

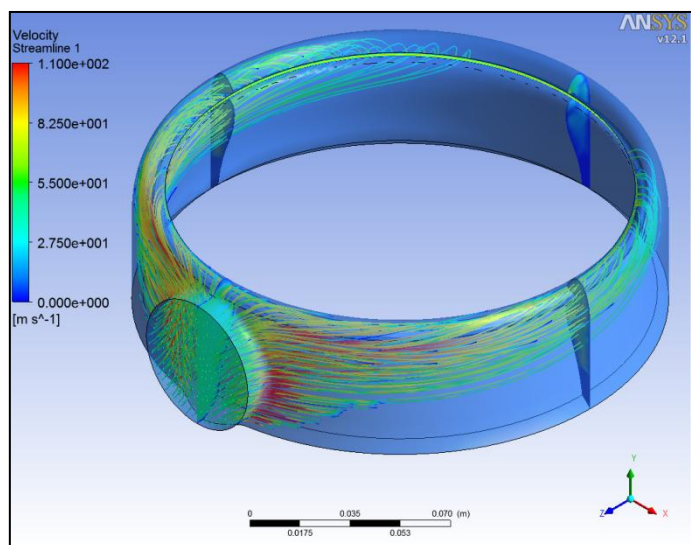


Figura 74: Streamline. Velocitat d'entrada de 45 m/s

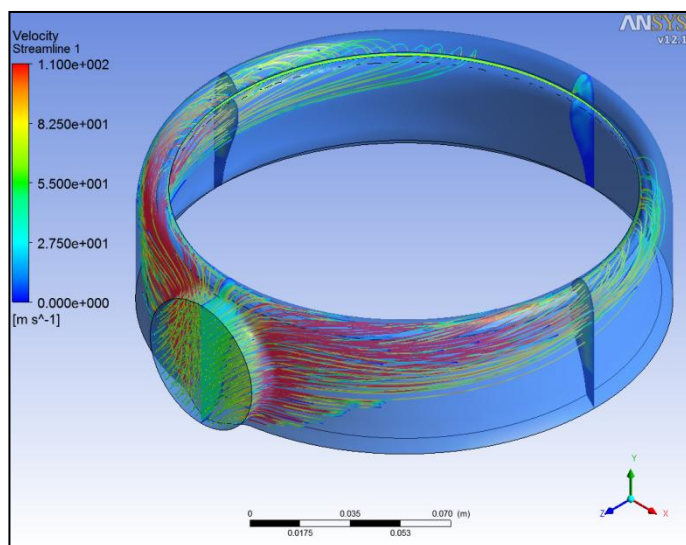


Figura 75: Streamline. Velocitat d'entrada de 60 m/s

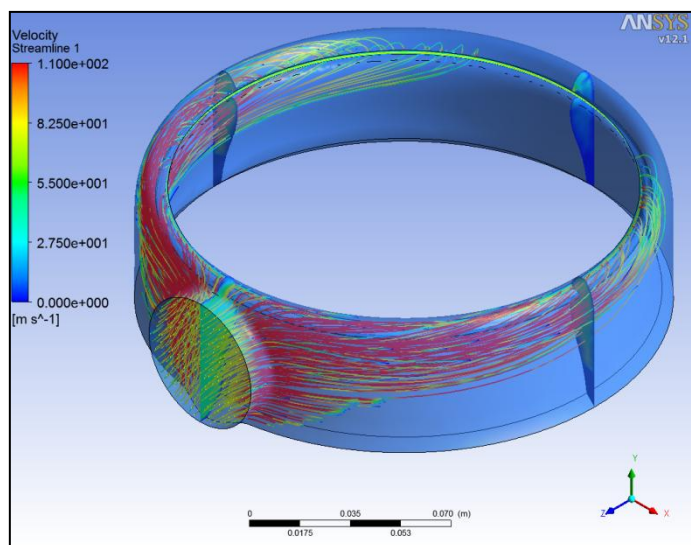


Figura 76: Streamline. Velocitat d'entrada de 75 m/s

Com es pot veure a mesura que augmenta la velocitat d'entrada el sistema, la velocitat del fluid augmenta de forma lineal. Un dels punts on es generen velocitats molt elevades és just als costats de l'entrada d'aire. Allà el fluid pren un gir de quasi 90° . Aquesta alta velocitat puntual segurament provoca unes pèrdues les quals podríem minimitzar amb un redisseny de l'entrada d'aire. Tot i així, com ja havíem vist, el prototip queda molt lluny del funcionament òptim a la realitat. Aquest fet fa que una possible correcció com aquesta tan sols disminuïria una mica la pèrdua de càrrega generada, seguint lluny del funcionament correcte per al vol.

Per tal de veure com variava la velocitat en un pla de secció frontal vaig crear les següents representacions. En aquest cas l'escala la va escollir de forma automàtica el mateix *Fluent*. La va adaptar als valors màxims i mínims apareguts en cada una de les simulacions. Així doncs, la diferència substancial de les següents representacions la veurem a l'escala de velocitats.

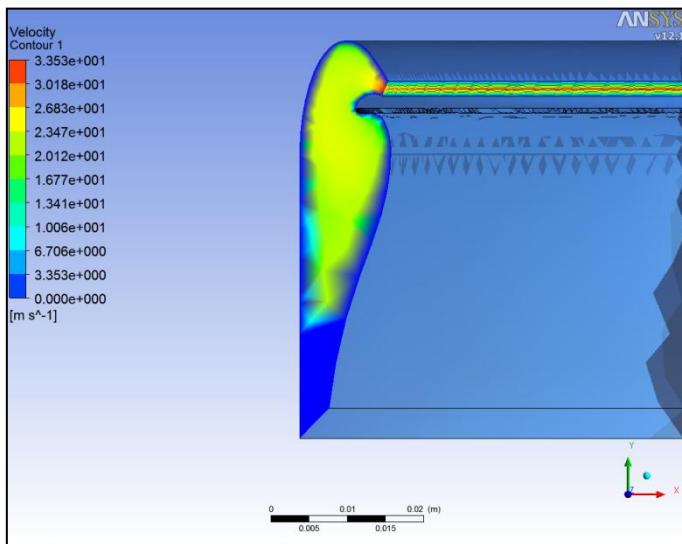


Figura 77: detall de la secció frontal per a una velocitat de 15 m/s

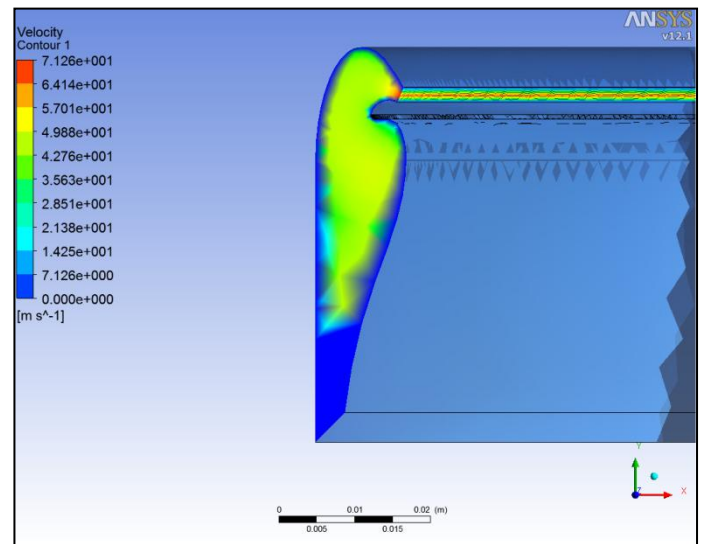


Figura 78: detall de la secció frontal per a una velocitat de 15 m/s

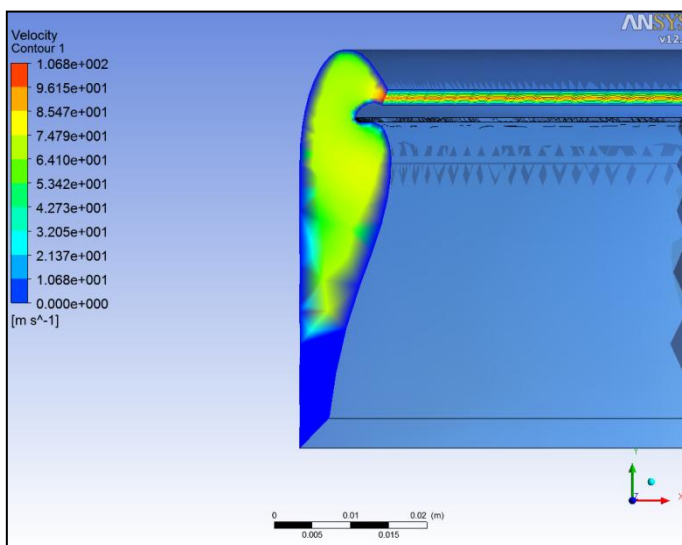


Figura 79: detall de la secció frontal per a una velocitat de 15 m/s

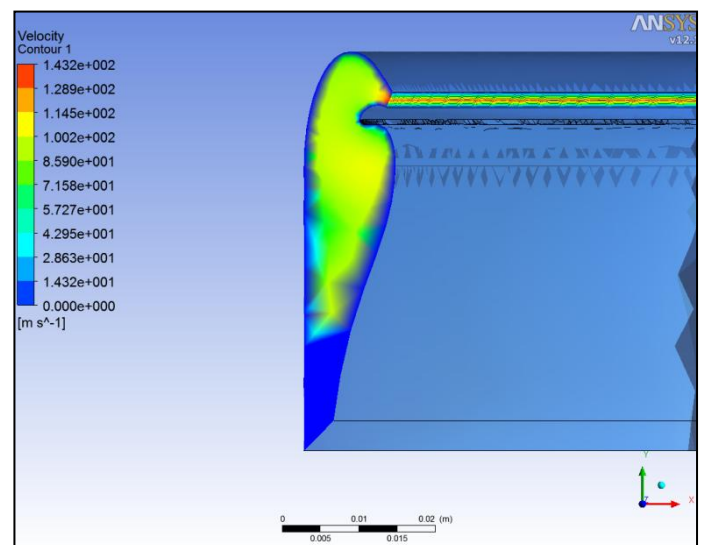


Figura 80: detall de la secció frontal per a una velocitat de 15 m/s

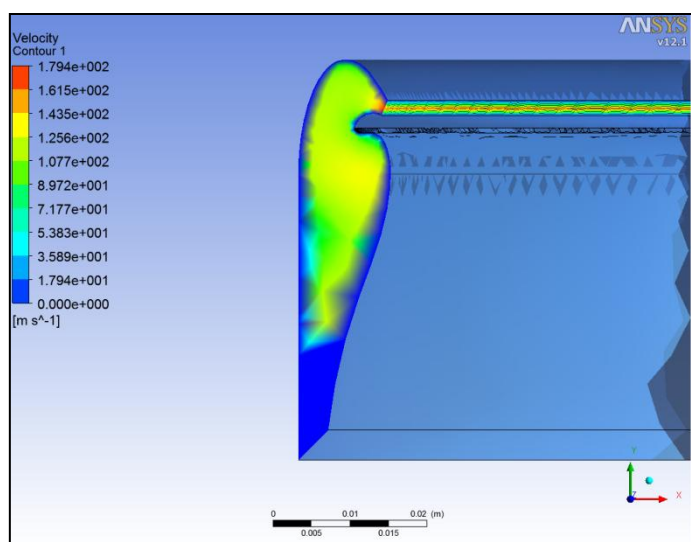


Figura 81: detall de la secció frontal per a una velocitat de 15 m/s

Un detall interessant de les següents representacions és veure com es genera l'augment de velocitat a la sortida del difusor. Just en aquest punt ens apareixen velocitats superiors a les que obteníem a la taula. Cal recordar que a la taula ens apareixen les velocitats promig d'aquestes sortides. Així doncs per tal d'assolir les velocitats promig obtingudes, tenint en compte que just a les parets del difusor la velocitat és 0, és lògic trobar velocitats superiors just a la part central de la sortida del difusor. Mitjançant aquestes últimes representacions deixo tancat l'anàlisi de l'interior del difusor.

8.8. Comportament de l'exterior del difusor per a una gamma de velocitats d'entrada de 30 m/s a 110 m/s

Per tal de realitzar la simulació de l'exterior vaig seguir un procediment similar a l'anterior. Vaig començar realitzant les 5 simulacions corresponents a cada una de les velocitats vistes en la Taula 20. El primer objectiu era aconseguir les velocitats promig aparegudes a sobre i a sota del difusor. Per la seva diferència obtindria els valors de les primeres sustentacions. Els resultats es mostren en la següent taula:

Velocitats superiors i inferiors obtingudes en les simulacions:

Pla entrada	Pla sortida	Km/h	Velocitats d'entrada al sistema		C entrada (part superior del difusor)		C sortida (part inferior del difusor)	
0,06	-0,055	108	30	m/s	1,17	m/s	2,99	m/s
0,06	-0,065	180	50	m/s	2,114	m/s	5,065	m/s
0,06	-0,055	252	70	m/s	2,62	m/s	7,16	m/s
0,06	-0,055	324	90	m/s	2,58	m/s	9,2	m/s
0,06	-0,055	396	110	m/s	2,33	m/s	11,09	m/s

Taula 19: velocitats superiors i inferiors obtingudes

Els valors que més importància tenen a l'hora de determinar la sustentació del model són els apareguts en la part inferior del difusor. Com es pot veure, aquests prenen sempre un valor més alt fet que al elevar-los després al quadrat són els que generen uns valors de sustentació més grans. Tant el pla d'entrada com el de sortida mostrats a la taula, són els plans d'on he tret les mesures de les velocitats. El valor de la taula és la coordenada Z (alçada del pla respecte el centre del difusor)

A la Figura 83 podem veure com es comporta la velocitat de la part inferior del difusor a partir de les d'entrada. Com podem comprovar segueixen un creixement lineal. Val a destacar la diferència entre velocitats d'entrada i sortida. Aproximadament el valor de la velocitat queda dividit entre 10. La diferència que ens interessa es veure el volum d'aire que aconseguim moure a aquesta velocitat. Les velocitats més altes les trobàvem per un flux petit. Aquestes acaben proporcionant velocitat a un volum d'aire molt més gran. L'encarregat de generar la sustentació.

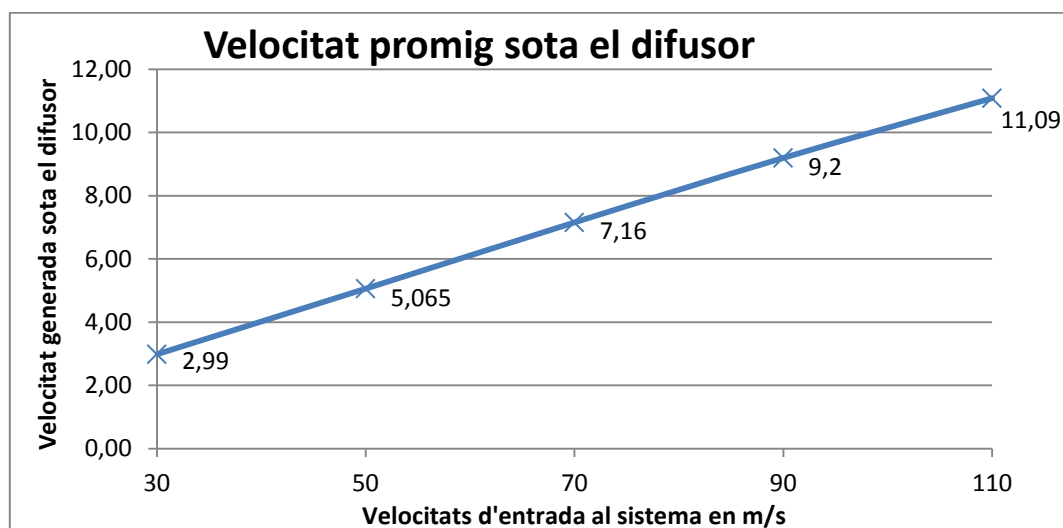


Figura 82: representació de les velocitats promig obtingudes

Un cop obtinguda la diferència de velocitats, inferiors i superiors, vaig crear un full de càlcul on a partir de les velocitats pogués generar les sustentacions aparegudes. Les podem veure a la següent taula.

Sustentació provocada per la diferencia de velocitats:														
Velocitats d'entrada		C entrada		C sortida		ρ aire			A	B	Força sustentació		Força sustentació	
30	m/s	1,17	m/s	2,99	m/s	1,225	Kg/m ³		-0,0822	0,5366	0,4545	N	0,0463	Kg
50	m/s	2,114	m/s	5,065	m/s	1,225	Kg/m ³		-0,2683	1,5399	1,2716	N	0,1296	Kg
70	m/s	2,62	m/s	7,16	m/s	1,225	Kg/m ³		-0,4120	3,0772	2,6652	N	0,2717	Kg
90	m/s	2,58	m/s	9,2	m/s	1,225	Kg/m ³		-0,3996	5,0805	4,6810	N	0,4772	Kg
110	m/s	2,33	m/s	11,09	m/s	1,225	Kg/m ³		-0,3259	7,3824	7,0565	N	0,7193	Kg

Taula 20: taula de les sustentacions aparegudes per diferència de velocitats

Seguidament faré una interpretació dels valors mostrats a la Taula 23. Com es pot veure la força de sustentació no creix de forma lineal. És lògic, per un costat i intervenen els valors de la velocitat de l'aire a la part superior del difusor. Com havíem vist aquests no tenien un creixement lineal. Per altra banda, si recordem l'expressió emprada per calcular la força elevava la velocitat al quadrat. Així doncs, el creixement no pot ser lineal.

$$\sum F_{y\ q.m.} = -C_1^2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_1 + C_2^2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_2$$

Ec. 28 expressió vista en l'apartat 7.4 Càlcul de sustentació

Els valors d'A i de B emprats a la taula són els resultats de calcular els dos paràmetres que provenen de cada una de les velocitats.

$$A = -(C_1^2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_1)$$

Ec. 29 valor A mostrat a la taula 23

$$B = C_2^2 \cdot \rho_{aire} \cdot A_2$$

Ec. 30 valor B mostrat a la taula 23

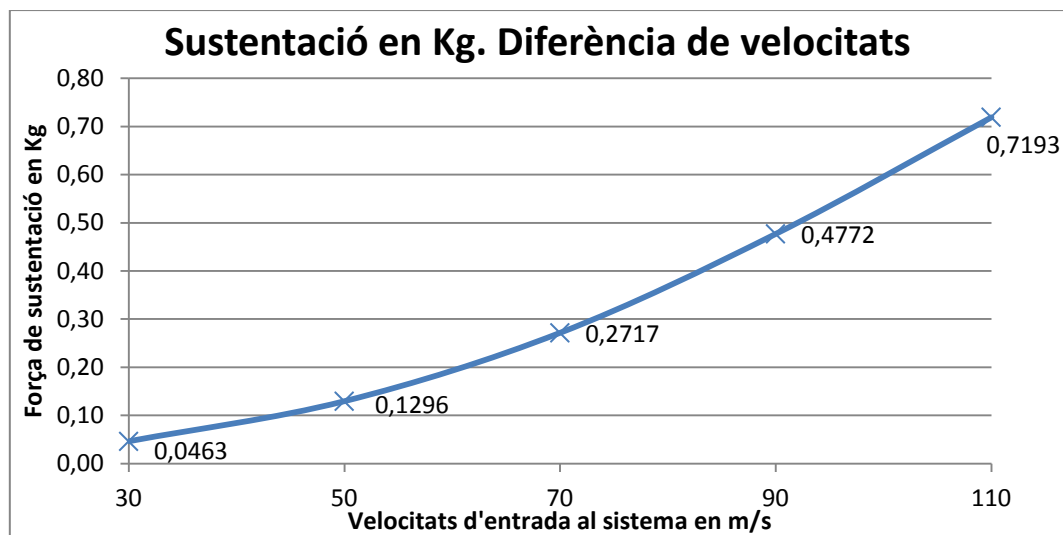


Figura 83: representació de la sustentació provocada per la diferència de velocitats

A la taula anterior podem veure la representació gràfica dels resultats obtinguts dels valors de la sustentació provocada per la diferència de velocitats. Més endavant n'extrauré les conclusions.

Sustentació provocada per la diferència de pressions:

A l'hora d'analitzar les diferències de pressions vaig crear una altra taula. Aquest cop m'interessava saber com variaven les pressions superiors i inferiors en cada un dels models de simulació. Igual que en la Taula 23, a les columnes del pla d'entrada i el de sortida hi trobem el valor de l'alçada dels plans creats per tal de mesurar el promig de pressions a sobre i a sota del difusor.

Pla entrada	Pla sortida	Km/h	Velocitats d'entrada al sistema		Pressió entrada (part superior del dif.)		Pressió de Sortida	
0,06	-0,1	108	30	m/s	-3,81	Pa	-1,94	Pa
0,06	-0,1	180	50	m/s	-14,39	Pa	-6,17	Pa
0,06	-0,1	252	70	m/s	-31,86	Pa	-23,44	Pa
0,06	-0,085	324	90	m/s	-48,24	Pa	-42,99	Pa
0,06	-0,055	396	110	m/s	-64,84	Pa	-61,59	Pa

Taula 21: pressions superiors i inferiors obtingudes

Per assolir una sustentació elevada ens interessa que es creï una diferència de pressions el més gran millor. En aquest apartat em vaig trobar amb limitacions del model de càlcul emprat. Tal i com he explicat anteriorment, a l'hora de simular el model em vaig basar en un volum d'aire en forma de mig cilindre on li restava físicament el volum del difusor. El problema és el següent. A l'hora de crear el volum de fluid aquest es tractava d'un volum finit. A la realitat, per contra, podem considerar que el volum d'aire exterior és obert. Aquest fet, si bé no va mostrar inconvenients en l'estudi de les velocitats va començar a mostrar problemes en el de les pressions. I més tenint en compte que estava simulant a velocitats lluny de la realitat.

La pressió externa del model teòricament hauria de ser de 0 Pa. El problema és que al generar velocitats tant altes com les aparegudes al sistema es creaven depressions a tot el volum de control fent que les pressions passessin a prendre valors negatius. Teòricament, a la realitat s'haurien de generar pressions negatives a la part superior del difusor, i positives a la part inferior. Anem a veure en forma de gràfica com afecten els resultats a les pressions obtingudes.

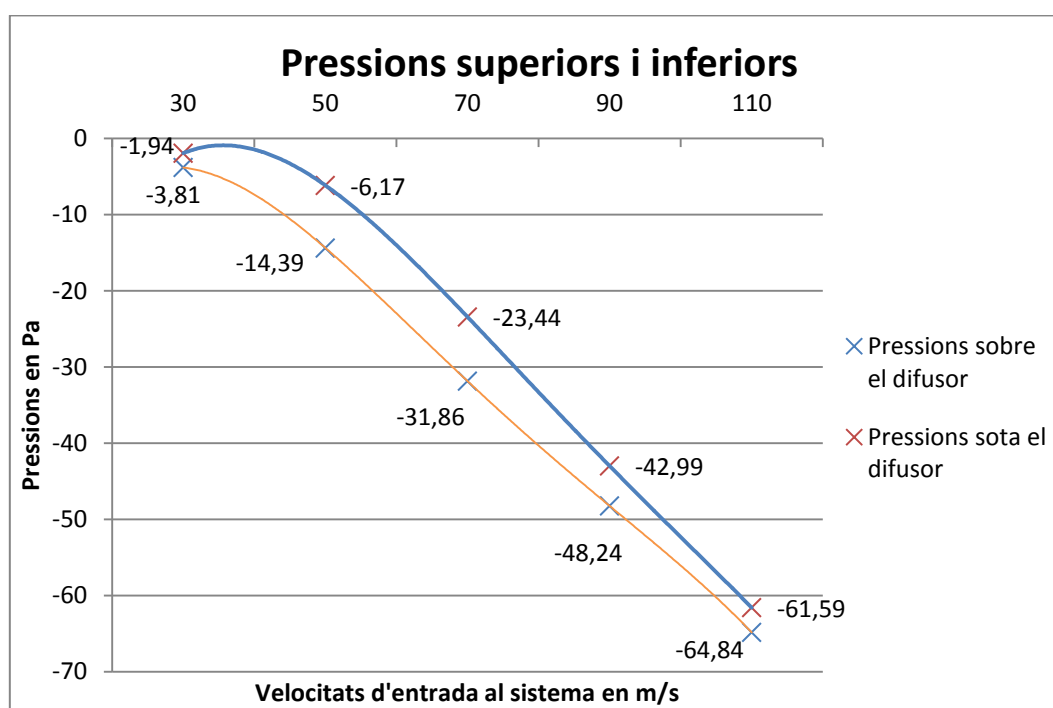


Figura 84: representació de les pressions superiors i inferiors obtingudes

Com es pot veure a la Figura 84, com més altes són les velocitats més s'ajunten les diferències de pressions. Tal i com ja he comentat, a l'hora d'extreure els valors de les diferències de pressions ho faig mitjançant un valor mitjà extret en un pla concret. Com més alta és la velocitat del fluid en la part central més alta és la depressió general formada al volum de control. Aquest valor negatiu el què provoca és la distorsió dels resultats tot fent baixar el gradient de pressions.

Per calcular la força de sustentació provocada per la diferència de pressions ho fem emprant la següent equació:

$$F_{y\ d.p.} = P_{inferior} \cdot A_{inferior} - P_{superior} \cdot A_{superior}$$

Ec. 31 expressió vista en l'apartat 7.4 Càlcul de sustentació

A l'hora de realitzar els càlculs per a cada una de les simulacions ho he fet mitjançant una altra fulla de càlcul.

Sustentació provocada per la diferència de pressions:											
Velocitats d'entrada al sistema		A sortida		Pressió entrada (part superior del dif.)		Pressió de Sortida		Força sustentació (N)		Força sustentació (Kg)	
30	m/s	0,049	m ²	-3,81	Pa	-1,94	Pa	0,09163	N	0,0093	Kg
50	m/s	0,049	m ²	-14,39	Pa	-6,17	Pa	0,40278	N	0,0411	Kg
70	m/s	0,049	m ²	-31,86	Pa	-23,44	Pa	0,41258	N	0,0421	Kg
90	m/s	0,049	m ²	-48,24	Pa	-42,99	Pa	0,25725	N	0,0262	Kg
110	m/s	0,049	m ²	-64,84	Pa	-61,59	Pa	0,15925	N	0,0162	Kg

Taula 22: taula de les sustentacions aparegudes per diferència de pressions

Després d'elaborar la taula de resultats vaig dibuixar la gràfica de sustentacions a partir de les velocitats de simulació. Tal i com comentava, passada una velocitat de simulació de 50 m/s la pressió ambiental del sistema és tant baixa que fa caure en picat la sustentació creada.

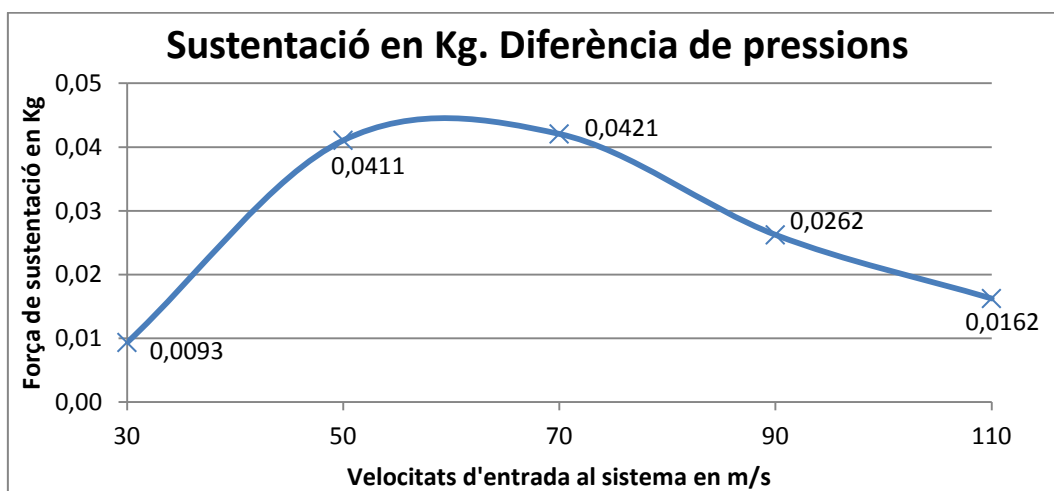


Figura 85: representació de la força de sustentació creada per la diferència de velocitats

Suma de sustentacions:

Un cop obtingudes les dues sustentacions per a tot el ventall de velocitats de simulació vaig crear la sustentació total del sistema. És aquí on es reflecteix la velocitat de sortida del difusor necessària per tal de generar al voltant de 750 g. de força neta. A la **taula** es mostra el resum de valors obtinguts:

Sustentació. Velocitats		Sustentació. Pressions		Força de sustentació total	
0,0463	Kg	0,0093	Kg	0,0557	Kg
0,1296	Kg	0,0411	Kg	0,1707	Kg
0,2717	Kg	0,0421	Kg	0,3137	Kg
0,4772	Kg	0,0262	Kg	0,5034	Kg
0,7193	Kg	0,0162	Kg	0,7355	Kg

Taula 23: taula de resultats de la sustentació total del sistema

Com es pot veure en la taula anterior la sustentació creada per la diferència de velocitat és substancialment més alta que la creada per la diferència de pressions. La suma de les dues forma la Figura 86. És on podem veure com es comporta la sustentació del model en funció de les velocitats d'entrada del sistema. El màxim de 0,736 Kg l'hem trobat per a una velocitat d'entrada al sistema de 110 m/s. Valors molt lluny de la realitat del difusor.

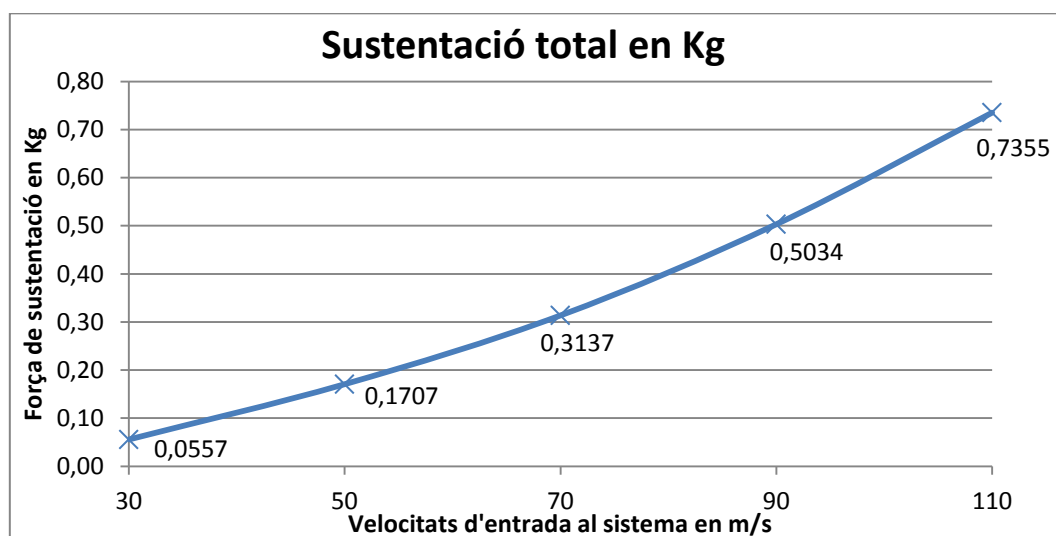


Figura 86: representació de la sustentació total del difusor

Interpretació de les representacions generades:

Per a una millor interpretació dels resultats utilitzaré les gràfiques generades des de l'Ansys per a cada una de les velocitats d'entrada. Ens fixarem en les representacions gràfiques de les velocitats i les de les pressions.

Començarem amb la visualització dels resultats del comportament de la velocitat a l'exterior del difusor.

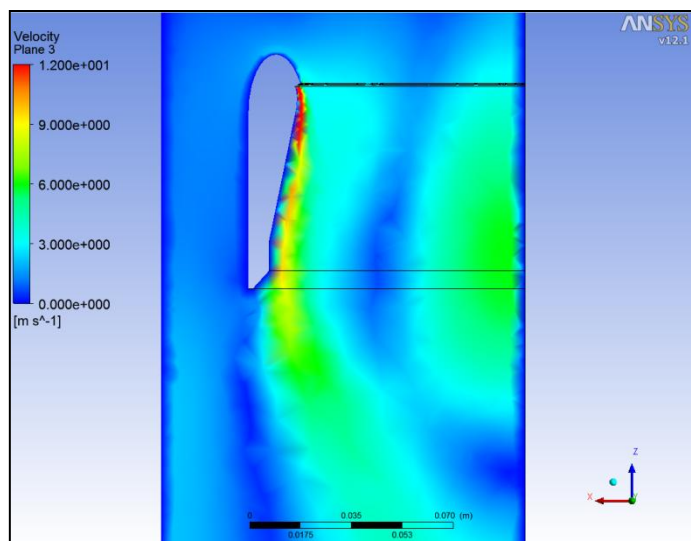


Figura 87: representació de les velocitats. Entrada de 30 m/s

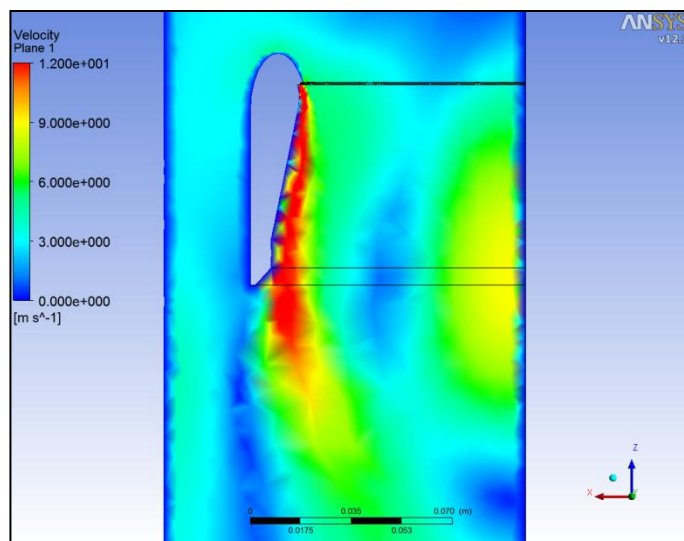


Figura 88: representació de les velocitats. Entrada de 50 m/s

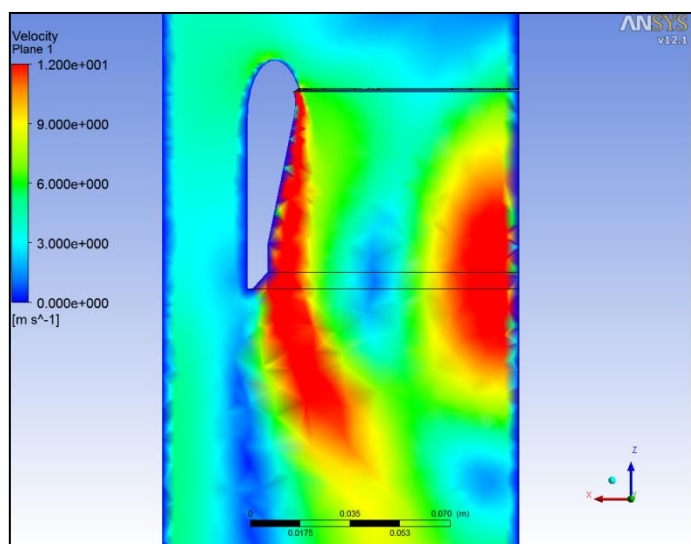


Figura 89: representació de les velocitats. Entrada de 70 m/s

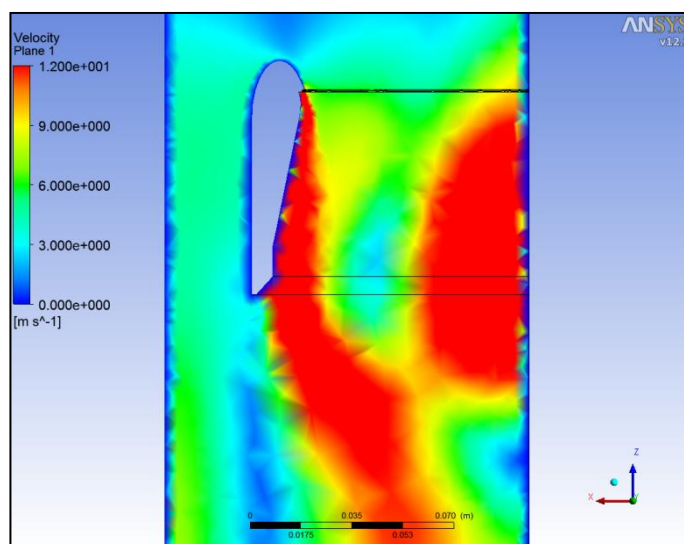


Figura 90: representació de les velocitats. Entrada de 90 m/s

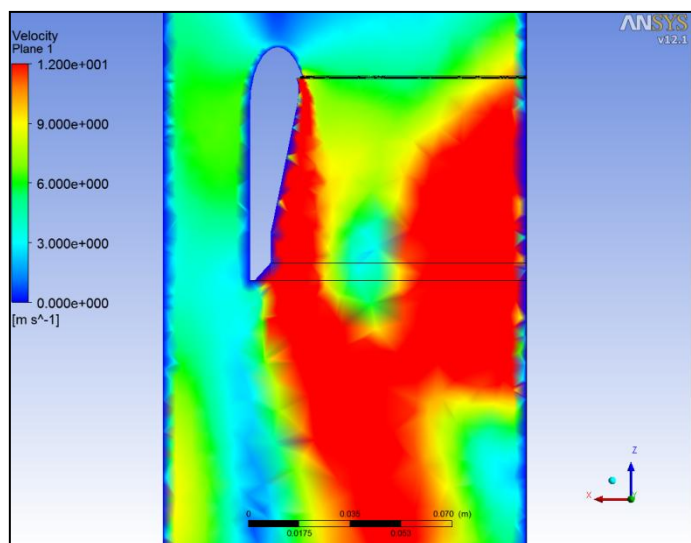


Figura 91: representació de les velocitats. Entrada de 110 m/s

En les Figures de la 87 a la 91 es mostra l'evolució de les velocitats aparegudes al difusor per a cada una de les entrades simulades. Per tal de poder comparar visualment els resultats obtinguts vaig crear una escala personalitzada i igual per totes les simulacions. Aquesta ens mostra els valors apareguts entre 0 m/s i 120 m/s. Com es pot veure a mesura que augmenta la velocitat d'entrada, més zones de la representació assolixen tons vermellosos. Aquestes zones són les que prenen velocitats properes als 120 m/s. La forma concreta de les zones de més velocitat tenen a veure amb com es desprèn el fluid de la paret del difusor, i com a la mateixa vegada xucla i accelera l'aire situat a la part superior.

Anem a visualitzar ara com afecten les pressions del voltant del difusor.

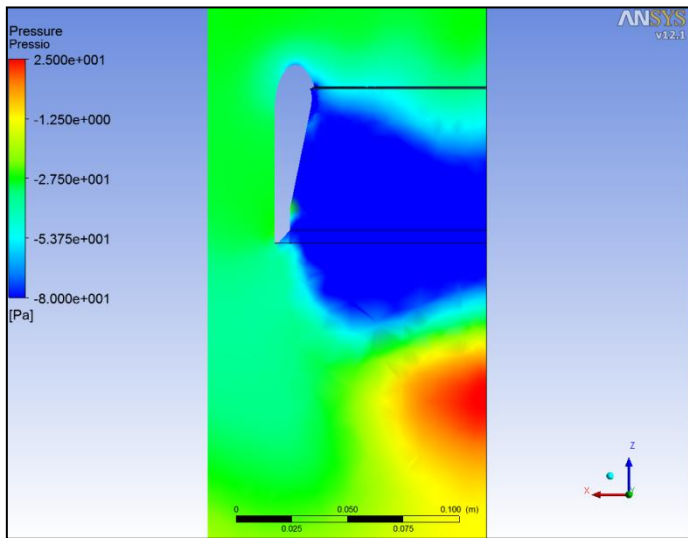


Figura 92: representació de les pressions. Entrada de 30 m/s

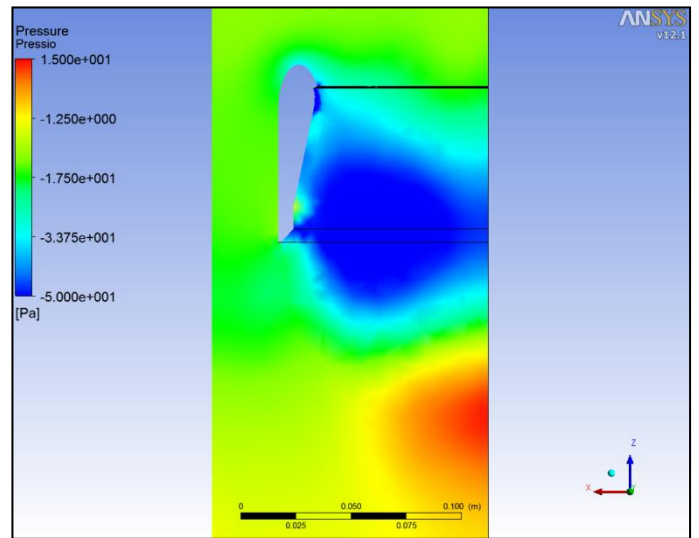


Figura 93: representació de les pressions. Entrada de 50 m/s

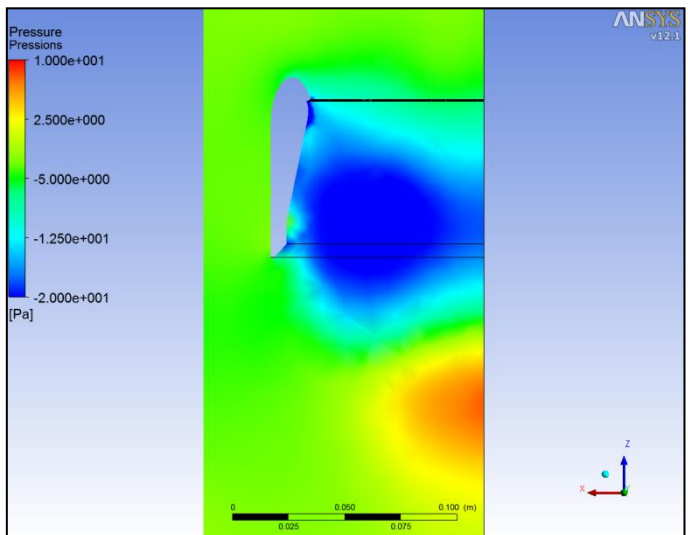


Figura 94: representació de les pressions. Entrada de 70 m/s

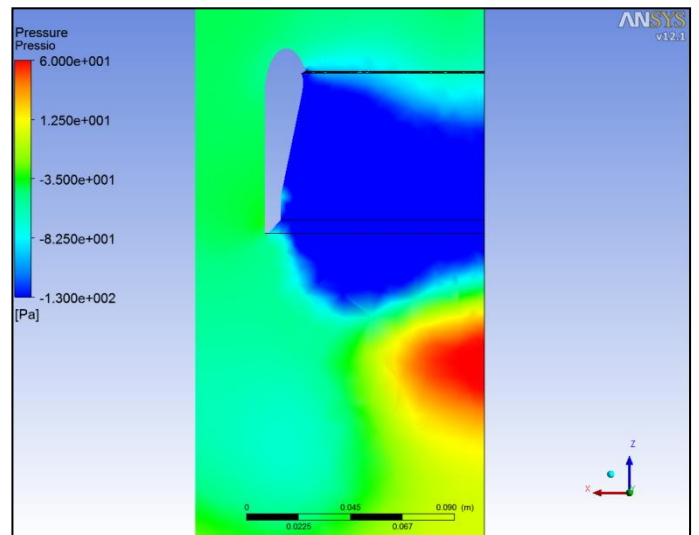


Figura 95: representació de les pressions. Entrada de 90 m/s

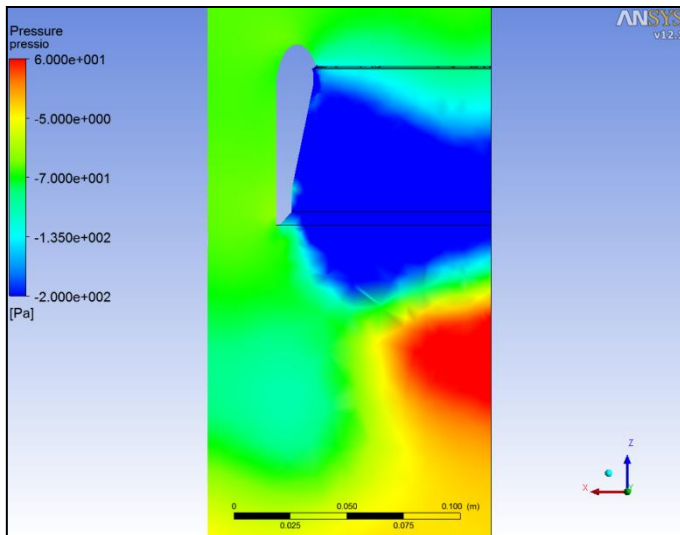


Figura 96: representació de les pressions. Entrada de 110 m/s

En aquest cas la representació de pressions la vaig generar per a escales de pressions diferents. Com es pot veure a les imatges els gràfics de colors són molt similars. Ho vaig fer així perquè dubtava dels resultats obtinguts. Tot i així es pot veure que el comportament de les zones de més i menys pressió en tots els casos és similar.

Per veure els resultats obtinguts ens hem de fixar en l'escala de cada una de les representacions. Tal i com comentava anteriorment, degut a les altes velocitats i al fet de simular en un sistema finit, la pressió de l'entorn de la simulació té un valor negatiu. Aquest valor depèn de les velocitats d'entrada, i per tant, de les simulacions realitzades. Pren valors d'entre -27,5 Pa en el cas de les velocitats d'entrada més baixes fins a arribar a assolir valors de -70 Pa en les simulacions on la velocitat s'acosta als 110 m/s.

La zona blava corresponent a la de molt baixes pressions situada a la part dreta del difusor, és la que ens demostra com es compleix l'efecte Venturi. L'alta velocitat crea la depressió vista i aquest xucla l'aire tot dirigint-lo cap avall. Val a dir que aquest efecte es veu molt potenciat per les altes velocitats de simulació. En els casos on la velocitat és molt baixa pren valors molt més baixos també disminuint-ne considerablement l'efecte.

8.9. Estudi i conclusions dels dos comportaments

Per extreure les conclusions sobre velocitats i pressions que ens proporcionarien el vol del drone ho farem a partir de dues gràfiques mostrades anteriorment. A partir de les corbes de funcionament del sistema podrem realitzar una aproximació de quina seria la velocitat necessària proporcionada per la turbina que ens generaria una sustentació d'uns 750 g. a la sortida del difusor. Ho farem realitzant el procés invers. Velocitat de sortida del difusor que ens proporciona una sustentació d'aproximadament 750 g.

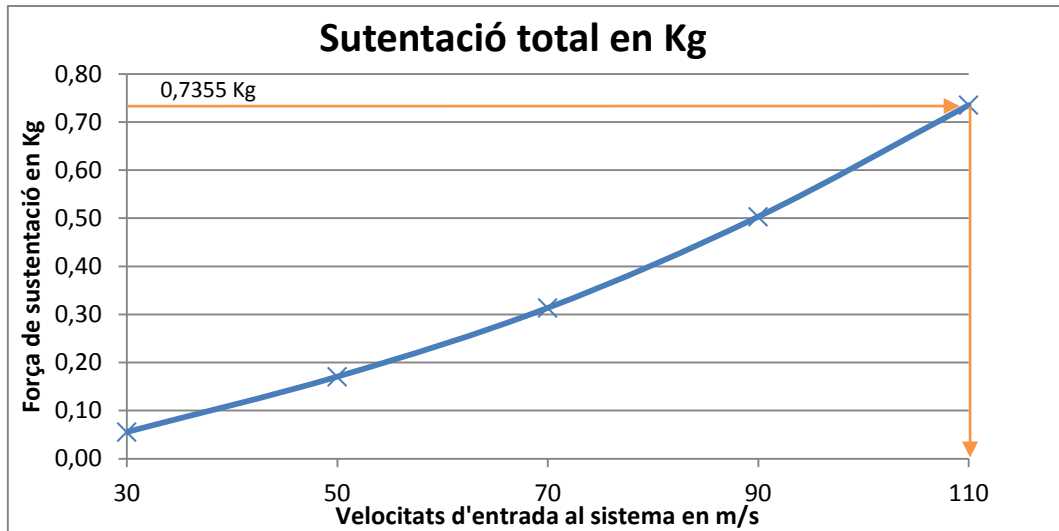


Figura 97: representació de la sustentació total. Velocitat que ens genera una sustentació propera als 750 g.

Un cop obtinguda la velocitat necessària a l'entrada anem a buscar quina velocitat i pressió ens hauria de proporcionar la turbina.

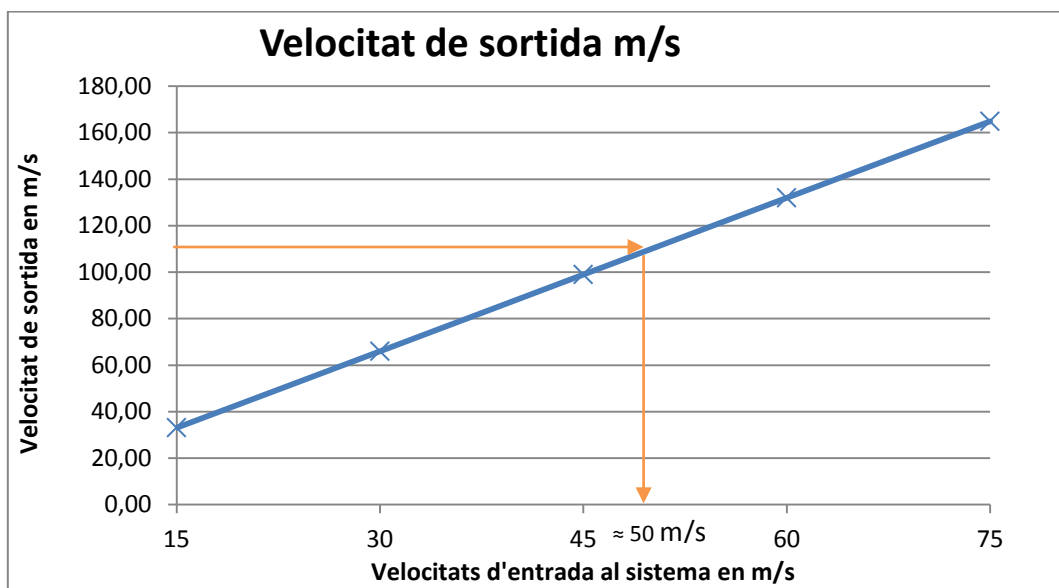


Figura 98: representació de la velocitat del sistema. Velocitat necessària a l'entrada de la turbina per tal d'assolir una velocitat a la sortida de 110 m/s

De forma visual podem concloure que la velocitat de la turbina necessària per generar un augment de la velocitat a la sortida del difusor de fins a 110 m/s és d'aproximadament 50 m/s.

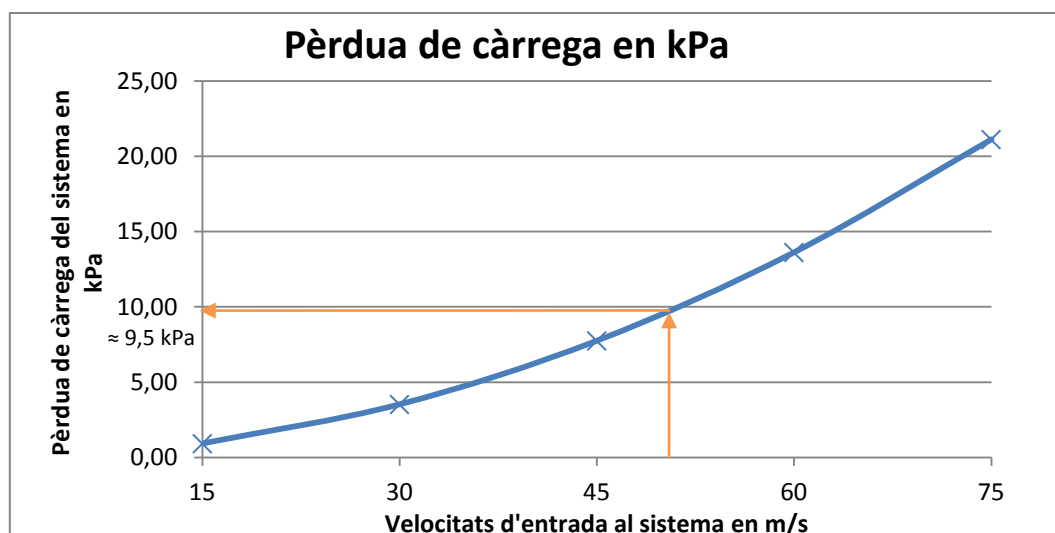


Figura 99: representació de la pèrdua de càrrega del sistema. Pèrdua de càrrega corresponent a una velocitat d'entrada de 50 m/s

A partir de la corba de pèrdua de càrrega del difusor, podem, a partir de la velocitat d'entrada obtinguda a la gràfica anterior, obtenir una aproximació de la pèrdua de càrrega que experimentarà el sistema. Amb una velocitat d'entrada de 50 m/s la pèrdua de càrrega voltarà els 9,5 kPa. Mitjançant una taula de valors reals del ventilador vist a l'apartat 7.5 *Replantejament del projecte. Passos previs* i els resultats, concloc la no viabilitat del projecte a partir del disseny creat.

	Velocitat	Pressió	Sustentació
Proporcionada pel ventilador:	6 - 7,35 m/s	210 - 80 Pa	736 g.
Requerida per volar:	50 m/s	9,5 kPa	736 g.

Taula 24: taula resum de les condicions ideals de la turbina per garantir el vol del drone

9. Estimació de costos

Seguidament faré un breu estudi sobre el valor econòmic del projecte realitzat. Faré una estimació del cost a partir dels següents conceptes:

Hores dedicades:

- Disseny: temps destinat a la confecció i millora dels dissenys.
- Impressió i acabats: aquest concepte inclou el temps de generació de *gcodes* així com la preparació prèvia i el temps de tractament de les peces un cop impreses. Polit, envernissat, etc...
- Càlcul: incloc aquí dins el temps dedicat a calcular i crear el full d'Excel utilitzat per al càlcul de les sustentacions i les gràfiques extretes.
- Simulació: dins el concepte simulació es té en compte el temps de creació dels models per simular (l'interior i l'exterior). No he inclòs el temps de càlcul ni el procés d'aprenentatge previ.

Recursos utilitzats:

- Plàstic: a partir del pes de les peces impreses extrec la massa de plàstic utilitzat en el disseny del prototip
- Temps d'impressió: inclou el consum elèctric corresponent a les hores d'impressió de tots les peces.
- Temps de simulació: inclou el consum provocat pel temps de simulació.

	Quantitat		Preu		Cost	
Disseny	30	hores	8	€/hora	240	€
Impressió i acabats	10	hores	8	€/hora	80	€
Càlcul	8	hores	8	€/hora	64	€
Simulació	20	hores	8	€/hora	160	€
Plàstic	1,6	Kg	16,95	€/Kg	27,12	€
Temps d'impressió ¹¹	16	Kw	0,08	€/Kwh	1,28	€
Temps de càlcul ¹²	1,8	Kw	0,08	€/Kwh	1,35	€
					572,5	€

Taula 25: estimació de costos

El cost de disseny estimat del prototip és de 572,5 €.

¹¹ Els Kw/h utilitzats mostrats a la taula són el producte del temps d'impressió, estimat en 80 hores, i el consum de la impressora valorat en 0,2 Kw/h

¹² Els Kw/h utilitzats mostrats a la taula són el producte del temps de càlcul, estimat en 22,5 hores, i el consum de l'ordinador valorat en 0,08 Kw/h

10. Conclusions generals del projecte

Després del més de mig any treballant amb el projecte prosseguiré a extreure conclusions sobre l'acompliment dels objectius. Dividiré les conclusions en dos grans blocs. Per un costat valoraré el procés d'impressió, les proves fetes i la feina de prototipatge del drone. Per altre conclouré tot l'apartat de simulació i estudi fluidodinàmic dels difusors.

El procés de disseny i prototipatge ha tingut relativament bons resultats pel què fa a la impressió. Ha quedat demostrat que les impressores són capaces d'imprimir l'estructura d'un drone satisfactòriament. Mitjançant els anàlisis estructurals realitzats he vist com l'estructura tindria una molt bona resistència a les forces aparegudes durant el funcionament pel qual ha estat dissenyat el drone. Tot i així presenten varies mancances. En primer lloc el temps d'impressió és llarg. El temps d'impressió total de les 4 peces que formen un difusor està al llindar de les 30 hores. Això suposa un temps d'impressió del drone sencer de més de 4 dies. A part en temes d'aerodinàmica tenim el problema de l'acabat superficial. Les rugositats fan que les peces requereixin un tractament posterior per tal de disminuir al màxim les pèrdues que provoquen.

On he trobat el xoc més brusc amb la realitat ha sigut en l'estudi aerodinàmic del model. Tot i en un inici creure que no necessitaria passar per la simulació, els resultats pràctics obtinguts m'han fet veure que la simulació era l'únic camí que em podia oferir respostes sobre el meu sistema. Les conclusions extretes sobre el funcionament del disseny creat confirmen la no viabilitat del projecte mitjançant la tecnologia emprada. El sistema té dos grans punts febles. Per un costat la geometria del difusor provoca unes pèrdues de càrrega impossibles d'assumir per les turbines de les dimensions requerides. Això provoca que el sistema d'aportació d'aire al sistema rebuï i no treballi en les condicions òptimes. Per altra banda la velocitat d'entrada de l'aire necessària per assolir la sustentació desitjada queda molt lluny de les possibilitats de les turbines de les mides emprades. Aquests dos fets impedeixen físicament el funcionament del drone estudiat.

La forma d'intentar seguir desenvolupant un projecte com el creat passaria per aconseguir crear un difusor que treballés a una velocitat interna més baixa. Aquest fet faria disminuir considerablement les pèrdues de càrrega. Un nou planteig de la geometria de la peça podria ajudar a fer front al problema. Paral·lelament caldria treballar en un difusor que aconseguís xuclar i impulsar més quantitat d'aire de forma més eficient. Finalment caldria treballar per crear una turbina amb uns àleps concrets per al disseny creat.

11. Referències bibliogràfiques

[1] Krossblade Aerospace [en línia]. Berlín: Krossblade Aerospace Systems LLC [Consulta: 19 de febrer del 2015]. Disponible a:

<<http://www.krossblade.com/history-of-quadcopters-and-multirotors/>>

[2] Intelligenia DYNAMICS [en línia]. Granada: Copyright © 2012 intelligenia DYNAMICS S.L. [Consulta: 19 de febrer del 2015]. Disponible a:

<http://www.iuavs.com/pages/aplicaciones_y_usos>

[3] senseFly [en línia]. Cheseaux-Lausanne, Switzerland: All rights reserved. senseFly Ltd [Consulta: 23 de febrer del 2015]. Disponible a:

<<https://www.sensefly.com/drones/ebee.html>>

[4] Tesis Digitales UDLAP [en línia]. Santa Catarina Mártir, San Andrés Cholula, México: Derechos Reservados © 1999-2015 Universidad de las Américas Puebla [Consulta: 12 de març del 2015]. Disponible a:

<http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo2.pdf>

[5] ENTRES D [en línia]. Barcelona: Krossblade Aerospace Systems LL © 2015 EntresD [Consulta: 17 de març del 2015]. Disponible a:

<<http://entresd.es/blog/tipos-de-impresoras-3d/>>

[6] Impresoras en 3D [en línia]. Trabajo realizado únicamente con fines academicos por: Pablo Frontela Alvarez [Consulta: 20 de març del 2015]. Disponible a:

<<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SGC.html>>

[7] GCODE ANALIZER. [en línia]. [Consultes prèvies a la impressió de cada una de les peces]. Disponible a:

<<http://gcode.ws/>>

[8] Claudio Mataix. Mecánica de fluidos i máquinas hidráulicas. Segunda edición. Ediciones del Castillo, S. A. Apartado de Correos 9088, Madrid. 84-219-0175-3. [Consulta: 21 d'abril del 2015]

[9] Ansys Fluent Tutorial Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg. [Consulta: juny del 2015]

[10] Ansys Fluent Tutorial Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg.
[Consulta: juny del 2015]

[11] Ebmpapst [en línia]. Bachmühle 2 74673 Muldingen, Germany. Copyright © 2015 ebm-papst. [Consulta: 30 de setembre del 2015]. Disponible a:

<http://www.ebmpapst.com/en/products/compact-fans/compact_fans.html>

ANNEX 1 (versió digital).

Continguts:

- Dissenys
 - Arxius STL exportats Netfabb
 - Arxius STL exportats Solidworks
 - Dissenys Solidworks
 - Gcodes exportats Slic3r
 - Registre dissenys
- Memòria
 - Imatges memòria
- Peces impreses
 - Experimentació
 - Imatges dissenys i reals
- Simulacions
 - Imatges simulacions
 - Difusors. Fluent
 - Simulació Solidworks
 - Tutorial. Fluent
 - Càlculs simulacions